

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



## FACULTAD DE INGENIERIA

### Escuela de Ingeniería Civil

#### “CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL MACRO DESLIZAMIENTO CHALACAY”

*Trabajo de Titulación previo a la obtención  
del Título de Ingeniero Civil.*

**Autor:**

Tania Lorena Torres Valverde  
C.I.:0104971130

**Director:**

Ing. Pablo Ismael Guzmán Cárdenas PH.D.  
C.I.:0102260106

Cuenca – Ecuador  
2017



## RESUMEN

Toda la cuenca del río Paute se presenta como una cuenca inestable, que fue empeorando por la intervención humana y otros fenómenos mayores como el deslizamiento del cerro Tamuga, por consiguiente se intensificó e incrementó diversos deslizamientos a lo largo de todo el embalse de Mazar, entre los de mayor interés el macro deslizamiento Chalacay, debido a que sobre este se encuentran varias estructuras deterioradas y zonas inestables con presencia de taludes completamente meteorizados.

Debido a la evidencia del movimiento de masas en Chalacay, se realizó un estudio investigativo y práctico con el objetivo de caracterizar el estado actual del macro deslizamiento Chalacay, en los aspectos hidrológicos y de clima con la idea de caracterizar apropiadamente el área de estudio.

El comportamiento hidrológico depende de varios factores, sin embargo en el siguiente trabajo solo se estudiarán cuatro de ellos (precipitación, temperatura, caudal y evapotranspiración), los cuales se analizarán separadamente a fin de conocer sus detalles.

Se recolectó y procesó datos meteorológicos de las estaciones más cercanas, se determinó el caudal por medio de métodos hidrológicos y se estimó la evapotranspiración en la zona de estudio. Luego todos estos factores se analizaron en conjunto para determinar un balance hídrico a la zona. Y finalmente se diseñó vertederos para el control de niveles y medición de caudal de cursos de agua superficiales que circulan y afectan al macro deslizamiento y así dotar de herramientas para mejorar el embalse.

La finalidad de este proyecto es determinar de manera indirecta la cantidad de agua que está en la masa de suelo inestable con el propósito de dar posibles soluciones para evitar el incremento de masas en el macro deslizamiento Chalacay para que el riesgo sea el mínimo.

Palabras claves:

Deslizamientos  
Evapotranspiración  
Caudales  
Vertederos  
Movimientos  
Balance hídrico



## ABSTRACT

The entire basin of the Paute River appears as an unstable basin, which was worsened by human intervention and other major phenomena such as the landslide of the Tamuga hill, consequently intensifying and increasing several landslides along the entire Mazar reservoir, between those of greater interest, the Chalacay macro-slip has significant relevance, because in this, there are several deteriorated structures and unstable zones with presence of completely weathered slopes.

Due to the evidence of the mass movement in Chalacay, an investigative and practical study was carried out with the aim of characterizing the current state of the Chalacay macro-slip in the hydrological and climatic aspects with the purpose of properly characterizing the study area.

The hydrological behavior depends on several factors, however in the following work only four of them (precipitation, temperature, flow and evapotranspiration) will be studied, each one of this, will be analyzed separately in order to know its details.

Meteorological data from the nearest stations were collected and processed, the flow was determined by hydrological methods and evapotranspiration was estimated in the study area. Then all these factors were analyzed together to determine a hydric balance to the zone. And finally, landfills were designed to control levels and measure the flow of surface water courses that circulate and affect the macro-slip and provide tools to improve the reservoir.

The purpose of this project is to indirectly determine the amount of water that is in the unstable soil mass in order to give possible solutions to avoid the increasing of masses in the Chalacay macro-slip, to keep the risk as low as possible.

Keywords:

Landslides  
Evapotranspiration  
Flow  
Landfills  
Movements  
Hydric balance



## ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
CAPITULO 1. GENERALIDADES.....	12
1.1    Introducción.....	12
1.2    Objetivos .....	13
1.2.1 Objetivo general.....	13
1.2.2 Objetivos específicos .....	13
CAPITULO 2. ZONA DE ESTUDIO .....	14
2.1    Descripción de la zona de estudio .....	14
2.1.1 Ubicación.....	14
2.1.2 Vegetación y uso del suelo. ....	15
2.1.3 Litología .....	16
2.1.4 Tipo de suelo .....	18
2.1.5 Uso del agua.....	18
2.1.6 Efecto del embalse de Mazar .....	20
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y METODOLOGIA DE ESTUDIO .....	22
3.1    Análisis del modelo digital de elevaciones (GIS).....	22
3.2    Caracterización del régimen climático e hidrológico.....	25
3.2.1 Delimitación de cuencas hidrográficas .....	26
3.2.2 Balance hídrico .....	27
3.3    Diagrama de caja y bigote .....	27
3.4    Información hidrometereológica.....	28
3.4.1 Precipitación .....	28
3.4.2 Temperatura .....	29
3.5    Evapotranspiración.....	29
3.5.1 Método de FAO: Penman - Monteith.....	30
3.5.2 Método Thornthwaite .....	36
3.5.3 Método Blannet - Criddle.....	37
3.6    Caudal.....	39
3.6.1 Trasposición de caudales .....	39
3.6.2 Aforos o medición de caudales .....	40



3.7	Diseño de vertederos .....	42
3.7.1	Dimensiones .....	42
3.7.2.	Instalación y operación. ....	46
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		47
4.1	Delimitación del macro deslizamiento.....	47
4.2	Precipitación .....	49
4.3	Temperatura .....	50
4.4	Evapotranspiración .....	52
4.4.1	Método Penman – Monteith .....	52
4.4.2	Método Thornthwaite .....	53
4.4.3	Método Blanney y Criddle .....	54
4.5	Caudal .....	55
4.6	Diagrama de caja y bigote .....	56
4.6.1	Método trasposición de caudales.....	56
4.6.2	Método FAO: Penman Monteith.....	57
4.6.3	Método Thornthwaite .....	57
4.6.4	Método Blanney – Criddle.....	58
4.7	Balance hídrico.....	58
4.7.1	Método FAO: Penman Monteith.....	59
4.7.2	Método Thornthwaite .....	61
4.7.3.	Método Blanney – Criddle .....	64
4.8	Diseño de vertederos.....	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		68
ANEXOS.....		72
Anexo 1. Estructuras deterioradas por el incremento de los asentamientos.....		73
Anexo 2. Grietas de tracción en el macro deslizamiento. ....		74
Anexo 3. Movimientos de masa.....		75
Anexo 4. Datos utilizados para corrección de temperatura.....		76
Anexo 5. Caudales medios mensuales ( $m^3/s$ ) de la cuenca Collay.....		77
Anexo 6.Coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) para cultivos perennes.....		78
Anexo 7. Coeficientes globales de usos consuntivos ( $K_g$ ) para diferentes cultivos. ....		79
Anexo 8. Caudales medios mensuales de la cuenca 1 en Chalacay. ....		80



Anexo 9. Caudales medios mensuales de la cuenca 2 en Chalacay. ....	81
Anexo 10. Caudal aforado de la cuenca 1 en Chalacay .....	82
Anexo 11. Caudal aforado de la cuenca 2 en Chalacay .....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas del macro deslizamiento Chalacay.....	14
Tabla 2. Características de las cuencas de Chalacay. ....	26
Tabla 3. Estación de Palmas y Collay con información histórica en el área de influencia del Macro deslizamiento Chalacay. ....	28
Tabla 4. Factor de corrección para los datos de temperatura promedio, máxima y mínima mensual. ....	29
Tabla 5. Área de aporte de la cuenca Collay y de las cuencas en Chalacay.....	40
Tabla 6. Coeficiente de trasposición de las cuencas en Chalacay. ....	40
Tabla 7. Coordenadas UTM de los puntos de control para cada cuenca en Chalacay.....	41
Tabla 8. Resultados del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método FAO: Penman Monteith. ....	59
Tabla 9. Resultados del balance hídrico para la cuenca 2 en Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método FAO: Penman Monteith .....	60
Tabla 10. Resultados del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método Thornthwaite .....	61
Tabla 11. Resultados del balance hídrico para la cuenca 2 de Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método Thornthwaite. ....	62
Tabla 12. Resultados del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método Blanney – Criddle .....	64
Tabla 13. Resultados del balance hídrico para la cuenca 2 en Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método Blanney – Criddle.....	65
Tabla 14. Dimensiones del vertedero para la cuenca 1 de Chalacay. ....	66
Tabla 15. Dimensiones del vertedero para la cuenca 2 en Chalacay. ....	66
Tabla 16. Datos de las estaciones en la cuenca del río Paute. ....	76
Tabla 17. Caudales medios mensuales (m <sup>3</sup> /s) de la cuenca Collay. ....	77
Tabla 18. Coeficientes de cultivo para determinar la curva de crecimiento de algunos cultivos perennes (Kc). ....	78
Tabla 19. Coeficientes globales (Kg) de algunos cultivos. ....	79
Tabla 20. Caudales medios mensuales (lt/s) de la cuenca 1 en Chalacay. ....	80
Tabla 21. Caudales medios mensuales (lt/s) de la cuenca 2 en Chalacay. ....	81
Tabla 22. Método del molinete.....	82
Tabla 23. Método volumétrico.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del macro deslizamiento Chalacay.....	14
Figura 2. Extremo sur del macro deslizamiento. Laderas convertidas en áreas de pastoreo de ganado vacuno y cultivos de maíz. Escasa vegetación propia de la zona (matorrales y arbustos).....	15

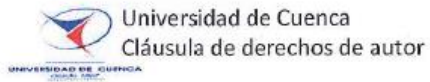


Figura 3.Extremo norte del macro deslizamiento. Empinadas laderas convertidas en áreas de pastoreo de ganado vacuno y cultivos de ciclo corto. ....	16
Figura 4. Detalle del corte de un talud en la altitud 2276 m s.n.m. del macro deslizamiento, se puede observar una formación geológica compuesta por esquistos. ....	17
Figura 5.Formación geológica compuesta de esquistos en la altitud 2136 m s.n.m. del macro deslizamiento.....	17
Figura 6. Erosión en los taludes del macro deslizamiento por el mal manejo de agua en la zona.....	19
Figura 7.a) Desagüe del agua de regadíos y agricultura hacia el extremo norte del macro deslizamiento. b) Desagüe del agua de la lluvia acumulada por las cunetas de la vía. ....	19
Figura 8.Vista panorámica de Chalacay. (Latorre, 2005), fotografía tomada antes del llenado del embalse. (CELEC EP, 2012).....	20
Figura 9.Vista panorámica de Chalacay tomada desde Llamacón en el año 2016. Deslizamientos en los taludes por la presencia del nivel del embalse.....	21
Figura 10. Visualización de la ortofotografía del SIG-TIERRAS tomada en el año 2009.Mapa de viviendas, terrenos y propiedades en el macro deslizamiento Chalacay. .	23
Figura 11. Visualización de la ortofotografía del SIG-TIERRAS tomada en el año 2009.Mapa de escarpes, grietas, afloramientos y quebradas del macro deslizamiento Chalacay. ....	24
Figura 12. Visualización de la ortofotografía del SIG-TIERRAS tomadas en el año 2009.Delimitación del área de aporte para cada cuenca hidrográfica. ....	26
Figura 17. Análisis de correlación de la precipitación en un año hidrológico de la Estación Palmas y la Estación Collay.....	40
Figura 24.Esquema para la deducción de la fórmula de descarga en un vertedero triangular. ....	43
Figura 25.Esquema para la deducción de la fórmula de descarga en un vertedero rectangular.....	45
Figura 26. Visualización de la ortografía del SIG-TIERRAS tomadas en el año 2009. Delimitación de la zona crítica del macro deslizamiento Chalacay.....	47
Figura 27.Vista panorámica del deterioro de los taludes en Chalacay. (Latorre, 2005), fotografía tomada antes del llenado del embalse. (CELEC EP, 2012). ....	48
Figura 13.Precipitación promedio mensual (mm) para la estación de Palmas desde enero de 1990 hasta diciembre de 2012. ....	49
Figura 14.Precipitación anual (mm) para la estación de Palmas desde 1990 hasta el 2012. ....	49
Figura 15.Temperatura media mensual, máxima y mínima corregida para la cuenca 1 desde enero de 1990 hasta diciembre de 2012. ....	50
Figura 16. Temperatura media mensual, máxima y mínima corregida para la cuenca 2 desde enero de 1990 hasta diciembre de 2012. ....	51
Figura 18. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Penman – Monteith.....	52



Figura 19. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Penman – Monteith.....	52
Figura 20. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Thornthwaite.....	53
Figura 21. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Thornthwaite.....	53
Figura 22. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Blanney y Criddle.....	54
Figura 23. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Blanney y Criddle.....	54
Figura 29. Caudal medio mensual (lt/s) de la cuenca 1 en Chalacay, desde enero de 1965 hasta diciembre de 2008.....	55
Figura 28. Caudal medio mensual (lt/s) de la cuenca 2 en Chalacay, desde enero de 1965 hasta diciembre de 2008.....	55
Figura 32. Diagrama de caja y bigote para los caudales de la cuenca 1 (a) cuenca 2 (b) obtenidos por el método de transposición de caudales (1965-2008).....	56
Figura 33. Diagrama de caja y bigote para los caudales de la cuenca 1 (a) cuenca 2 (b) obtenidos por el método FAO: Penman Monteith (1990-2012). ....	57
Figura 30. Diagrama de caja y bigote para los caudales de la cuenca 1 (a) cuenca 2 (b) obtenidos por el método Thornthwaite. (1990-2012). ....	57
Figura 31. Diagrama de caja y bigote para los caudales de la cuenca 1 (a) cuenca 2 (b) obtenidos por el método Blanney – Criddle. (1990-2012). ....	58
Figura 34. Esquema del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método FAO: Penman Monteith. ....	59
Figura 35. Esquema del balance hídrico para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método FAO: Penman Monteith. ....	60
Figura 36. Esquema del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método Thornthwaite.....	62
Figura 37. Esquema del balance hídrico para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método Thornthwaite.....	63
Figura 38. Esquema del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método Blanney – Criddle. ....	64
Figura 39. Esquema del balance hídrico para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método Blanney – Criddle. ....	65
Figura 40. Esquema vertedero rectangular para la cuenca 1 en Chalacay. ....	66
Figura 41. Esquema del vertedero triangular para la cuenca 2 en Chalacay.....	67
Figura 42. Función de temperatura. ....	76





Yo Tania Lorena Torres Valverde autora de la Tesis “Caracterización Hidrológica del Macro Deslizamiento Chalacay”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 14 de febrero del 2017

TANIA LORENA TORRES VALVERDE

C.I: 010497113-0



Universidad de Cuenca  
Cláusula de propiedad intelectual

Yo Tania Lorena Torres Valverde autora de la Tesis "Caracterización Hidrológica del Macro Deslizamiento Chalacay", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 14 de febrero del 2017

TANIA LORENA TORRES VALVERDE

C.I010497113-0



## DEDICATORIA

*A Dios.*

*Por haberme dado salud y paciencia para lograr mis objetivos y permitirme estar en esta etapa de mi vida, además de su infinita bondad y amor.*

*A mis padres*

*Por haberme ayudado en todo momento, por sus consejos, paciencia, valores y por los ejemplos de constancia y rectitud que me han permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su infinito amor. Este título de ingeniera también es de ustedes papi y mami.*



## AGRADECIMIENTOS:

*A Dios*

*Con toda la humildad de mi corazón dedico primeramente mi trabajo a Dios, quien me ha brindado de muchas bendiciones en toda mi corta vida.*

*A mis padres*

*A mis padres por enseñarme que con amor y constancia todo es posible, gracias a su infinito amor y paciencia durante este largo trayecto de mi vida universitaria. A mi hermana, abuelos, tíos, primos y amigos quienes pusieron un granito de arena para cumplir este sueño tan anhelado.*

*A mis profesores*

*Al Ingeniero Pablo Guzmán PH.D. por la confianza brindada y por el apoyo incondicional a lo largo de este proyecto, gracias por compartir sus experiencias y conocimientos. Y a todo el personal de CELEC EP por la ayuda brindada durante el proyecto.*

*Al Ingeniero Cristian Coello MSc. quien durante los dos últimos años de vida universitaria ha marcado de momentos agradables para mí y mis compañeros, por su gran conocimiento en la materia y sobre todo por ese don de gente que no solo le convierte en un profesor si no en un maestro, cuyas enseñanzas llevaremos en nuestros corazones y de manera especial en el mío por el asesoramiento en la elaboración de mi tesis.*



## CAPITULO 1. GENERALIDADES

### 1.1 Introducción

El río Paute a lo largo de su curso atraviesa la cordillera real andina (Oriental), sus flancos se caracterizan por escarpes de alta pendiente las cuales se incrementan gradualmente conforme se adentra en la estribación oriental. Los taludes del río Paute en esta zona están conformados en su mayoría por depósitos coluviales con presencia de pizarras y esquistos. A lo largo del estrecho valle sobre el cual corre el río Paute se han identificado zonas inestables correspondientes a antiguos movimientos de masas y fallas locales, los cuales se han reactivado o son susceptibles a corrimientos, asentamientos y derrumbes, producto de la intervención humana y otros fenómenos mayores como el de la Josefina ocurrido el 29 de marzo de 1993 en el cual 30 millones de m<sup>3</sup> de tierra se deslizaron desde el cerro Tamuga, provocando una inundación aguas abajo con un caudal máximo estimado de 8300 m<sup>3</sup>/s (Abril and Knight 2004).

Teniendo en consideración la importancia de la cuenca hídrica del Paute que alimenta a las plantas hidroeléctricas de Paute Integral Centrales Mazar (176 MW), Molino (1076 MW) y Sopladora (487 MW), los cuales están en riesgo si fallaran los diversos macro deslizamientos a lo largo de todo el embalse, paralizando la producción industrial del país en más del 50% (López 1995), otro sector que se vería afectado es el comercial, sector agrícola, floricultura y, con cambios profundos en la vida de los habitantes del cantón Paute y del país que son los beneficiarios de la planta hidroeléctrica Paute Integral; todos estos factores perjudicarían la economía y el desarrollo del país. Acotando que los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los seres humanos causando miles de muertes y daño en las propiedades de los habitantes en el sector de la planta. (Suárez 1985).

Así, los macros deslizamientos están siendo estudiados, analizados y monitoreados por la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP), siendo entre los de mayor interés el movimiento de masa que se encuentra en el sector Chalacay, debido a que sobre este se asienta el pueblo que lleva el mismo nombre. Actualmente se han colocado 14 pilas topográficas, distribuidas a lo largo del macro deslizamiento Chalacay, las cuales son monitoreadas desde las pilas topográficas fijas colocadas en Osoyacú desde la posición UTM (764699E, 9703036N) PSAD 56, 17S y Llamacón desde la posición (763639E, 9702778N) PSAD 56, 17S. Además debido a la peligrosidad media que este deslizamiento representa para la población de Chalacay (CELEC EP 2015) y a los daños que se registraron en algunas de las propiedades que se asientan en este sector (ver anexo 1), la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP) ha determinado la viabilidad técnica de reubicar los espacios comunales con un costo aproximado de dos millones de dólares.

Hacer frente al manejo del macro deslizamiento implica estudiar y conocer todos los aspectos geofísicos relativos del mismo. Así el clima y la hidrología son fundamentales, pues de ellos se derivan la infiltración y escorrentía que forman parte de las variables que pueden agravar (acelerar) el estado del movimiento, relacionados estos directamente con el flujo subterráneo, nivel de humedad, y peso de la masa de suelo. El análisis de las aguas subterráneas (niveles freáticos) por medio de perforaciones o estudios geofísicos no se aborda en este estudio debido al tiempo y al costo que representa.

El siguiente trabajo asume como uno de los principales factores de inestabilidad al agua acumulada en el macro deslizamiento, así se busca establecer el balance hídrico en la



zona, es decir una evaluación cuantitativa de los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen de él, en un determinado intervalo de tiempo. Adicionalmente, se diseñarán vertederos para el control de niveles y medición de caudal de cursos de agua superficiales que circulan y afectan al macro deslizamiento.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Evaluar el estado climático e hidrológico del área del macro deslizamiento Chalacay.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1. Delimitar el área del macro deslizamiento Chalacay.
2. Evaluar cuantitativamente los recursos hídricos que ingresan al macro deslizamiento Chalacay y los que salen de él en un determinado intervalo de tiempo.
3. Diseñar vertederos para medir el caudal de pequeños cursos de agua que circulan por el macro deslizamiento Chalacay y poder así dotar de herramientas para mejorar el embalse.



## CAPITULO 2. ZONA DE ESTUDIO

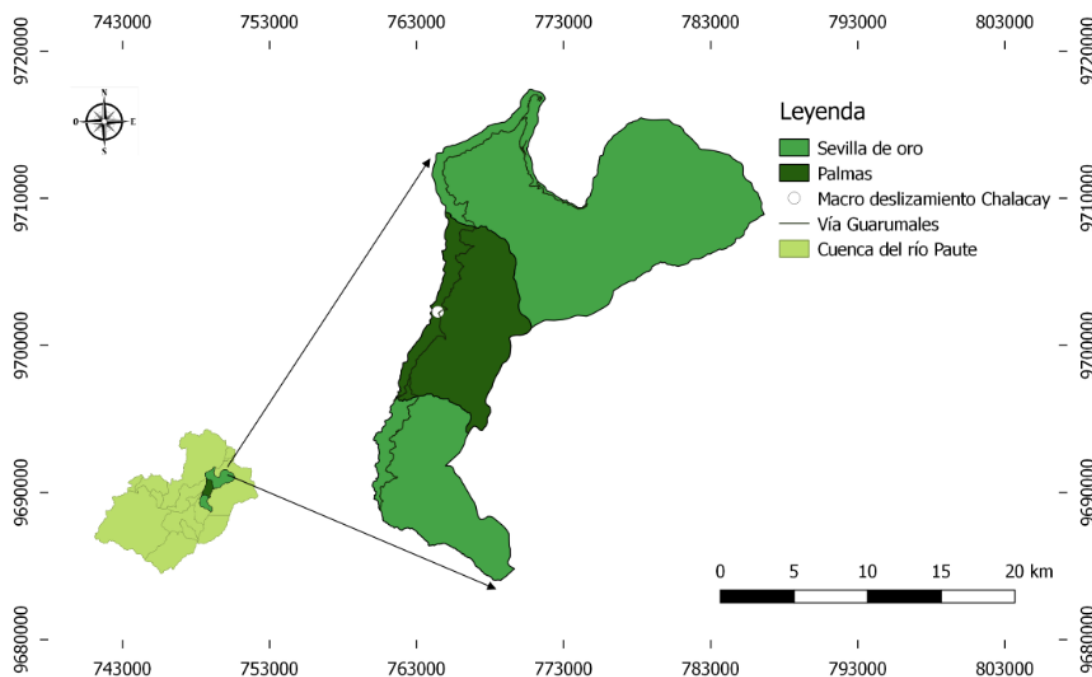
### 2.1 Descripción de la zona de estudio

#### 2.1.1 Ubicación

El área de estudio se encuentra ubicada en la zona nororiental del valle del río Paute. Ubicado en la parroquia Palmas, del cantón Sevilla de Oro, provincia Azuay, Ecuador. A una distancia aproximada de 10,5 km al Sur de la Presa Mazar. Geográficamente, al Norte del macro deslizamiento se encuentra la Quebrada Chalacay, al Este se ubica la parte alta del poblado Chalacay, y al Oeste se encuentra el embalse de la Presa Mazar. La figura 1 muestra la ubicación del macro deslizamiento de Chalacay.

*Tabla 1. Coordenadas del macro deslizamiento Chalacay.*

Ubicación del macro deslizamiento Chalacay		
LATITUD - SUR	-2,74112	Grados
LONGITUD - OESTE	-78,64497	Grados
ALTITUD	2285	m.s.n.m



*Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del macro deslizamiento Chalacay.*

### 2.1.2 Vegetación y uso del suelo.

La vegetación ha demostrado un efecto positivo sobre la estabilidad de los taludes, para evitar problemas de erosión, reptación y fallas sub superficiales (Suárez 1989). El tipo de vegetación es un aspecto importante para determinar la intercepción, escorrentía e infiltración que afecta la estabilidad del macro deslizamiento.

El macro deslizamiento Chalacay presenta vegetación natural con mezcla de pastizales y arbustos; en la mayor parte de la zona el cultivo vegetal es el maíz, asociado con frejol y tomate. El cambio de usos de suelo de la tierra se manifiesta principalmente en la parte alta del macro deslizamiento, donde el bosque nativo es cada vez más removido y reemplazado por los pastizales. La conversión de la cubierta terrestre de bosques a pastizales tiene un efecto permanente sobre la estabilidad de la pendiente, ya que existen bajos valores permanentes de estabilidad de los suelos en los pastos (Guns and Vanacker 2013).

En la zona baja existe una escasa vegetación propia (matorrales y arbustos) de la zona y un alto grado de deforestación del bosque, extensas áreas sin árboles y sus empinadas laderas convertidas en áreas de pastoreo de ganado vacuno y cultivos de ciclo corto, (ver figura 2 y 3). Toda esta área no constituye ni el 2% del macro deslizamiento. Sin embargo, la deforestación tiene un efecto claro en la estabilidad de la pendiente (Guns and Vanacker 2013).



*Figura 2. Extremo sur del macro deslizamiento. Laderas convertidas en áreas de pastoreo de ganado vacuno y cultivos de maíz. Escasa vegetación propia de la zona (matorrales y arbustos).*





*Figura 3. Extremo norte del macro deslizamiento. Empinadas laderas convertidas en áreas de pastoreo de ganado vacuno y cultivos de ciclo corto.*

### 2.1.3 Litología

Los taludes del macro deslizamiento de Chalacay están conformados en su mayoría por depósitos coluviales con presencia de pizarras y esquistos. Las pizarras y esquistos pertenecen al grupo de rocas metamórficas que son el resultado del metamorfismo o recristalización de rocas ígneas y sedimentarias. En este proceso las rocas son sometidas a cambios texturales y mineralógicos, donde sus características originales son alteradas o casi perdidas.

Las rocas metamórficas pizarra y esquisto son rocas foliadas con proporciones altas de filosilicatos (Suárez 1989), la foliación y la esquistosidad presente en estas rocas metamórficas las hacen muy susceptibles al lavado superficial y al proceso de meteorización debido a su facilidad de ruptura. Así es de esperar que durante el paso de la avenida extraordinaria producida por el derrumbe del cerro Tamuga, la erosión fue masiva en los taludes del macro deslizamiento Chalacay incrementando la inestabilidad de la zona.



*Figura 4. Detalle del corte de un talud en la altitud 2276 m s.n.m. del macro deslizamiento, se puede observar una formación geológica compuesta por esquistos.*



*Figura 5. Formación geológica compuesta de esquistos en la altitud 2136 m s.n.m. del macro deslizamiento.*



#### 2.1.4 Tipo de suelo

De acuerdo con la Zonificación Agroecológica del Austro Ecuatoriano (Dercon 1998), el macro deslizamiento de Chalacay se encuentra en la zona agroecológica seis compuesta por cuatro tipo de suelos: Dystric Leptosol, Haplic Luvisols, Dystric Cambisols y Vertic Luvisols.

Los Leptosoles que aparecen en las pendientes fuertes del valle (Dercon 1998) son en general suelos de drenaje-libre y con propiedades estagnicas (hidromorfía por encharcamiento superficial). La erosión es la mayor amenaza para las áreas de Leptosoles.

Los Luvisoles que se encuentran en las partes planas (Dercon 1998) tienen características físicas favorables para su uso agropecuario. Además tienen una superficie del suelo rica en agregados de tipo granular, siendo porosos y bien aireados.

Los cambisoles se caracterizan por un desgaste ligero o moderado del material original y por la ausencia de cantidades apreciables de arcilla, materia orgánica, compuestos de Al y/o Fe. Los cambisoles en pendientes empinadas se conservan mejor bajo el bosque. Además la mayoría de ellos tienen texturas medias y por lo general una buena estabilidad estructural, alta porosidad, buena capacidad de retención de humedad y buen drenaje interno. (FAO 2014).

#### 2.1.5 Uso del agua

Las lluvias, el mal manejo de las aguas de regadío, cultivos en pendientes fuertes, rotura de acequias y alcantarillas rotas saturan de agua al suelo, aumentando la presión intersticial y disminuyendo el esfuerzo efectivo, lo que incide con la resistencia al corte del mismo, volviéndose plástico y con mayor probabilidad de generación de deslizamientos en la zona (River 2010). Durante las visitas a la zona de estudio se pudo observar que el mal manejo de las aguas de regadío y ganadería en las pendientes fuertes y la acumulación del agua de las lluvias han provocado pequeños torrentes que desembocan en el embalse causando erosión a la ladera.

Además se observó que el agua de la lluvia acumulada por las cunetas de la vía, el agua de regadíos y ganadería llega hacia una alcantarilla que sirve de desagüe hacia la parte más crítica del macro deslizamiento, provocando un flujo subterráneo que circula por toda la pendiente hasta llegar a la parte más plana de la zona provocando pequeños torrentes que desembocan en el embalse causando erosión a la ladera. El flujo subterráneo y los cambios en la cantidad de agua acumulada son críticos para la estabilidad de un deslizamiento, debido a que ellos controlan el balance hidrológico que puede alterar el grado de saturación y la elevación del nivel freático. (Suárez 1989).





*Figura 6. Erosión en los taludes del macro deslizamiento por el mal manejo de agua en la zona.*



a)



b)

*Figura 7.a) Desagüe del agua de regadíos y agricultura hacia el extremo norte del macro deslizamiento. b) Desagüe del agua de la lluvia acumulada por las cunetas de la vía.*

### 2.1.6 Efecto del embalse de Mazar

Durante el diseño y la construcción de presas y embalses la ocurrencia de deslizamientos es uno de los principales problemas presentes. Debido a que la mayor parte de las presas y embalses están situados en valles naturales que resultan frecuentemente de la erosión fluvial o glacial cuyos flancos son inestables.

La inundación del pie de los taludes, así como los rápidos descensos de nivel, pueden provocar primeras roturas o reactivar antiguos deslizamientos, existentes con frecuencia en el entorno de los embalse, (Pinyol 2008). La presencia de embalses durante periodos de tiempo suficientes causan que el material de los márgenes se sature, con lo cual aumenta la presión intersticial reduciendo la tensión efectiva del suelo (Salazar, Oñate, and Morán 2012). Al saturarse el pie de la ladera, se represa el agua subterránea hacia arriba, el suelo pierde su estabilidad y se producen deslizamientos. (Ver figura 9).



*Figura 8. Vista panorámica de Chalacay. (Latorre, 2005), fotografía tomada antes del llenado del embalse. (CELEC EP, 2012).*



*Figura 9. Vista panorámica de Chalacay tomada desde Llamacón en el año 2016.  
Deslizamientos en los taludes por la presencia del nivel del embalse.*



## **CAPÍTULO 3. MATERIALES Y METODOLOGIA DE ESTUDIO**

### **3.1 Análisis del modelo digital de elevaciones (GIS).**

Los deslizamientos pueden ser identificados a través de observaciones e interpretaciones de fotografías aéreas y observaciones de campo. En los mapas topográficos es posible observar disturbios o discontinuidades en las curvas de nivel (curvas no paralelas o caóticas) y relacionarlas con terrenos inestables (Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación-COSUDE 2002).

En el área de estudio, adicionalmente a el análisis de mapas topográficos se realizaron visitas a la zona de estudio en compañía de los geólogos de la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP); se visitaron las partes más perjudicadas de la zona y se hizo un recorrido por todo el macro deslizamiento para observar aspectos geológicos como grietas, fisuras, afloramientos, asentamientos del suelo, quebradas, escarpes pronunciados, cambios de vegetación, zonas húmedas (ojos de agua), etc.

Todo esto con el propósito de mejorar la delimitación del área del macro deslizamiento en función de los aspectos geológicos mapeados y la topografía del terreno.



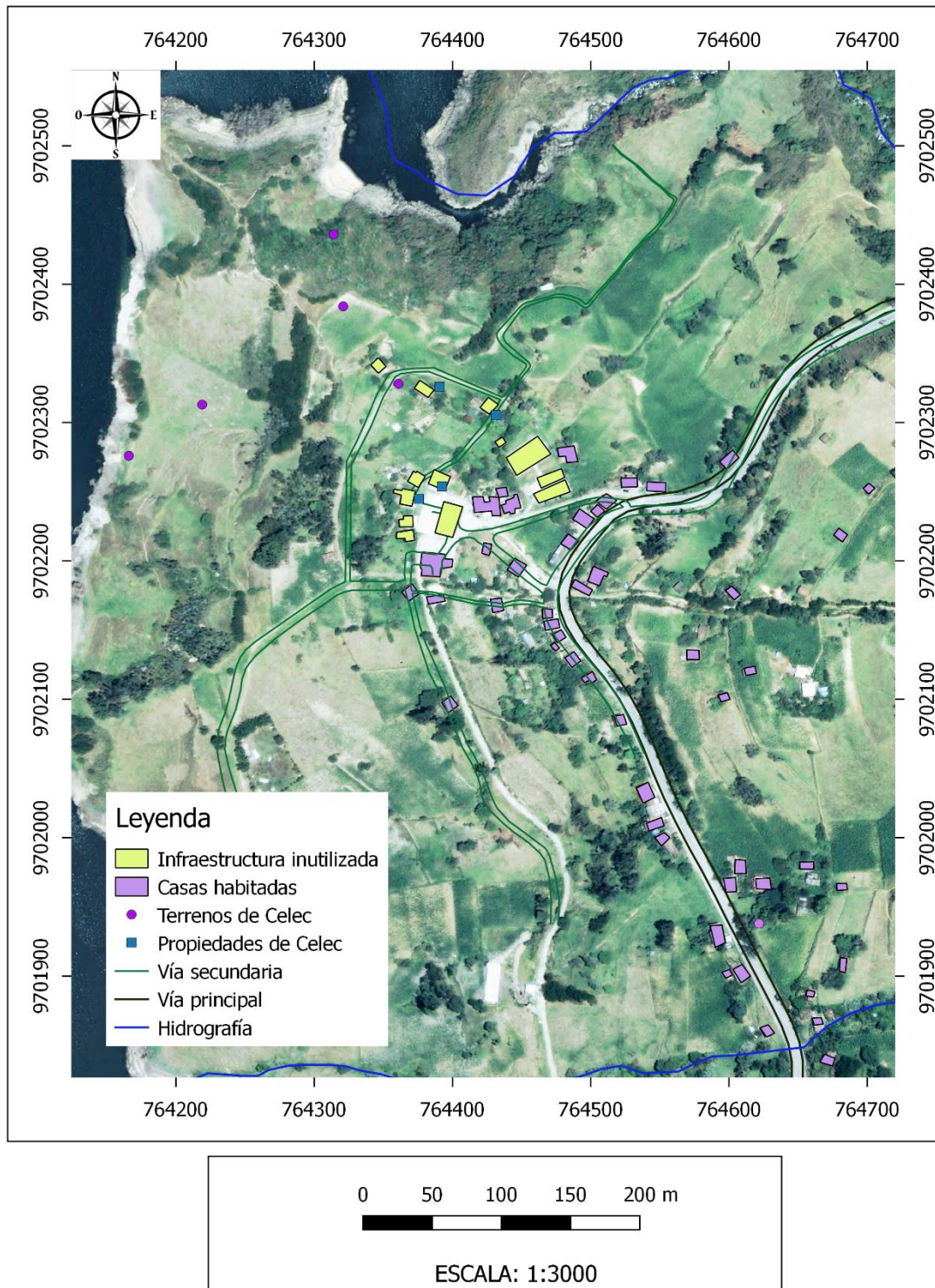


Figura 10. Visualización de la ortofotografía del SIG-TIERRAS tomada en el año 2009. Mapa de viviendas, terrenos y propiedades en el macro deslizamiento Chalacay.



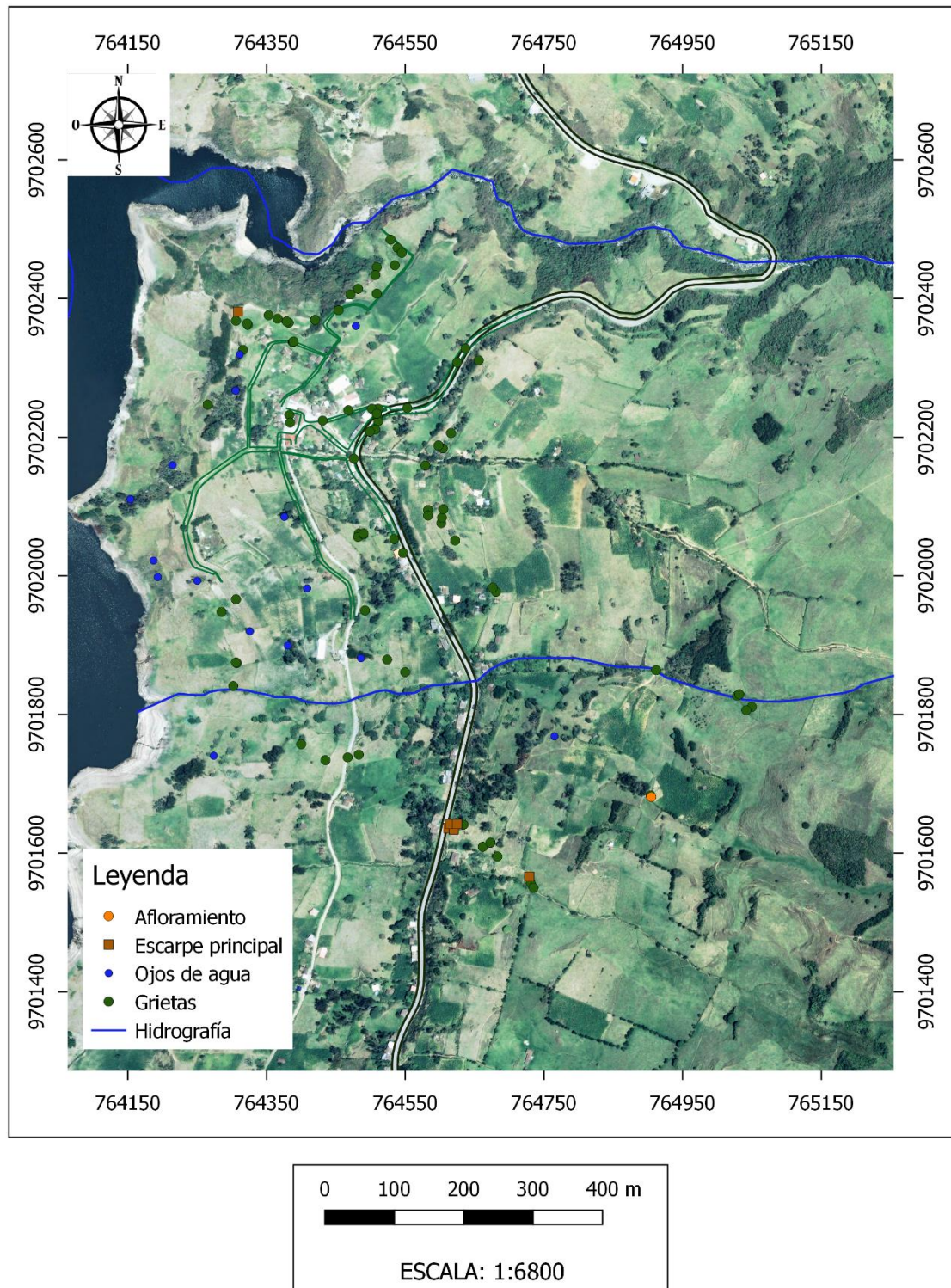


Figura 11. Visualización de la ortofotografía del SIG-TIERRAS tomada en el año 2009. Mapa de escarpes, grietas, afloramientos y quebradas del macro deslizamiento Chalacay.



Las grietas mapeadas son denominadas de tracción, debido al empuje de la masa del suelo desplazada de manera profusa en el deslizamiento y las direcciones de las mismas oscilan entre los 230° y 325° Az. Las aberturas de las grietas de tracción van desde los 20cm con profundidades mayores a 1m y longitudes mayores a 10 m. Adicionalmente existen viviendas que ya han sido indemnizadas observándose el deterioro progresivo que han sufrido las estructuras debido a los asentamientos acelerados. (Ver anexo 1)

Es difícil predecir con certeza las características geométricas o morfológicas de las grietas presentes en el suelo, aspectos como el punto de inicio de una grieta, su dirección y profundidad, su interrelación con otras grietas, etc., pero la presencia de las mismas en las estructuras y en las laderas, es una clara evidencia de la dinámica de movimiento del suelo. (Ver anexo 2)

A continuación se muestra los criterios por tipo, utilizados para la identificación del macro deslizamientos (Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación-COSUDE 2002).

- ✓ Geológicos: rocas alteradas, afloramientos no explicados, grietas, litología del terreno.
- ✓ Aspectos hidrológicos: abundancia relativa de agua (ojos de agua), desviación de quebradas.
- ✓ Vegetación: troncos torcidos y/o inclinados, ruptura de raíces, poca vegetación propia de la zona.
- ✓ Infraestructura; postes inclinados, casas u otras construcciones agrietadas, grietas u ondulaciones y hundimientos en los pavimentos.
- ✓ Históricos: Testimonios de eventos pasados

### **3.2 Caracterización del régimen climático e hidrológico.**

Debido a que el agua es el factor que más frecuentemente se le asocia con los deslizamientos, y en los diferentes aspectos en los cuales interviene, debe ser objeto de un estudio especial; de allí la importancia de la hidrología. Sin embargo, el proceso no es siempre tan simple y la activación de un deslizamiento por acción del agua, es un fenómeno complejo con una gran cantidad de variables (Suárez 1989). Por esta razón el siguiente trabajo asume como uno de los principales factores de inestabilidad el agua acumulada en el macro deslizamiento, así se busca establecer el balance hídrico de la zona como herramienta que permita conocer teóricamente el agua acumulada en ella. Por lo tanto cualquier diferencia entre las entradas y salidas deben reflejarse un cambio en el almacenamiento de agua dentro del área.

En el estudio del balance hídrico intervienen muchas variables los cuales se analizan separadamente a fin de conocer aspectos hidrológicos y de clima para luego ser analizados en conjunto y así determinar un balance hídrico a la zona.

El estudio del balance hídrico al macro deslizamiento se realizará por medio de dos cuencas hidrográficas que abarcan toda la zona de estudio, las cuales serán estudiadas separadamente.



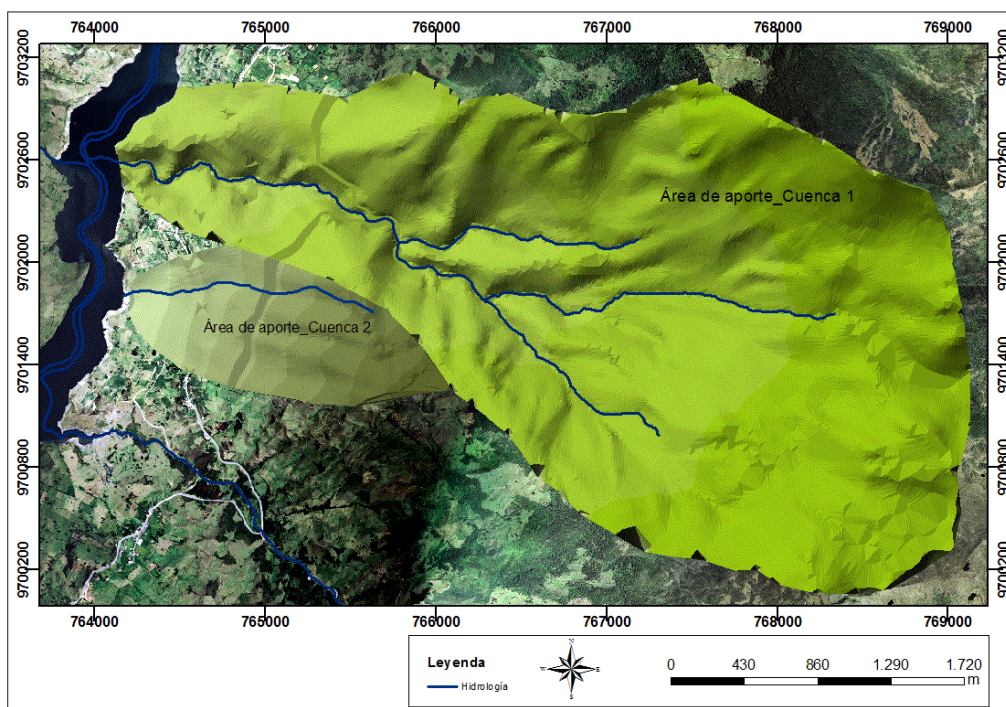
### 3.2.1 Delimitación de cuencas hidrográficas

Para la delimitación de las cuencas hidrográficas en el macro deslizamiento de Chalacay se identificó la red de drenaje o corrientes superficiales, y se delimitó aplicando las siguientes pautas básicas:

1. Invariablemente, la divisora corta perpendicular a las curvas de nivel, estrictamente posible, por los puntos de mayor nivel topográfico.
2. Cuando la divisora va aumentando su altitud, corta a las curvas de nivel por su parte convexa.
3. Cuando la altitud de la divisora va decreciendo, corta a las curvas de nivel por la parte cóncava.
4. Como comprobación de la delimitación se utilizó el software ArcGIS.

*Tabla 2. Características de las cuencas en Chalacay.*

	Cuenca 1	Cuenca 2	
Área de aporte	943,31	131,64	ha
Cota Máx.	3500	2860	m.s.n.m.
Cota mín.	2140	2140	m.s.n.m.
Desnivel	1360	720	m
Longitud del cauce principal	4970	1552	m



*Figura 12. Visualización de la ortofotografía del SIG-TIERRAS tomadas en el año 2009. Delimitación del área de aporte para cada cuenca hidrográfica.*



### 3.2.2 Balance hídrico

El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, conocido como ecuación de la continuidad. Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier periodo de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada. Además a partir de un estudio del balance hídrico es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre.

La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación de volumen de agua almacenada en la zona. En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación recibida en la superficie del suelo y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca desde fuera. Las salidas de la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de suelo y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca considerada. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación, y la ecuación del balance hídrico deberá incluir, por tanto, un término residual o de diferencia. (Unesco 1981).

Debido al tiempo y al costo que se requiere realizar un análisis de aguas subterráneas (niveles freáticos) por medio de perforaciones y por la escasez de instrumentación para obtener valores de infiltración básica de suelos, profundidad de las raíces extractoras del agua, la capacidad de campo, el siguiente estudio carece de esta investigación.

De manera que, la forma más práctica para estimar el balance hídrico en el macro deslizamiento de Chalacay, es a partir de la ecuación simplificada, como se muestra a continuación:

Ecuación simplificada:

$$P = Q + Eto \pm \delta$$

Ecuación 1

Donde:

*P*: Precipitación(mm/mes)

*Q*: Caudal(mm/mes)

*Eto*: Evapotranspiración(mm/mes)

*δ*: Almacenamiento(m/mes)

Anteriormente de aplicar un balance hídrico a la zona de estudio es primordial verificar la consistencia de los valores obtenidos.

### 3.3 Diagrama de caja y bigote

Diagrama de caja y bigote es un tipo de gráfico que permite interpretar los datos para las variables que intervienen en el balance hídrico y aplicando el criterio de John Tukey 1977 (Ledezma, Molina, and Young 2007) se determinará la consistencia de los mismos. La aplicación del criterio se explicará a continuación:

Después de obtener el caudal para el mes de octubre de varios años se aplicara el método diagrama de caja a los valores y luego se comprobara con el caudal obtenido por los aforos



en el mismo mes. Si el caudal promedio obtenido por los aforos se encuentra fuera del rango de confianza en el diagrama de caja y bigote, se le considera como valor atípico y por lo tanto los valores obtenidos aplicados en el diagrama de caja son inconsistentes, por consiguiente no se podrán utilizar para el balance hídrico, caso contrario si el valor se encuentra dentro del rango de confianza del diagrama de caja se ultimaré la consistencia de los mismo como alta.

A continuación se analizarán las variables que intervienen en el balance hídrico, para luego analizarlas en conjunto y así obtener una aproximación del almacenamiento de agua en el macro deslizamiento. Y se indicará la metodología aplicada para determinar el caudal obtenido por aforos que se utilizará en el método diagrama de caja y bigote.

### 3.4 Información hidrometereológica

Disponer de datos adecuados para el conocimiento del clima requiere administrar una red de estaciones cercanas a la zona de estudio cuando se carece de una estación propia, como es el caso del macro deslizamiento Chalacay.

Se recopiló información de la estación Palmas y la estación Collay del Instituto INAMHI ubicada a 2 km y 5 km respectivamente de la zona de estudio. El instituto nacional de hidrología y meteorología (INAMHI) posee información específica, tanto observada, registrada como procesada de todos los datos que se generan en la red de estaciones de su propiedad (INAMHI 1999). La información general que se ha recopilado se resume en la tabla 3.

*Tabla 3. Estación de Palmas y Collay con información histórica en el área de influencia del Macro deslizamiento Chalacay.*

Información hidrometereológica					
Estación	Código	Tipo	Fuente	Número de años	Cota
Collay Aj Paute	H-929	Hidrológica	INAMHI	43	2110
Palmas	M-045	Meteorológica	INAMHI	22	2230
Collay		Meteorológica	CELEC	3	2539

Fuente: Anuarios del INAMHI y CELEC

#### 3.4.1 Precipitación

Al caer una gota de lluvia sobre una superficie desprotegida produce desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo, en consecuencia la mayoría de deslizamientos ocurren después de lluvias fuertes o durante periodos lluviosos. La precipitación es, normalmente, la única fuente de humedad que tiene el suelo y por eso conviene que su medida y cálculo se hagan con gran precisión, pues de ello depende, en gran manera, la exactitud de todos los cálculos del balance hídrico.(Unesco 1981).

El Instituto nacional de hidrología y meteorología (INAMHI) proporcionó datos correspondientes a la estación meteorológica Palmas, en el cual se reportan datos mensuales para el período comprendido entre 1990 al 2012. Para los respectivos análisis estadísticos, se han descartado los años con datos mensuales faltantes.



### 3.4.2 Temperatura

Los valores de temperatura registrados en Chalacay responden principalmente a la posición geográfica del país, cuyas latitudes la ubican en las regiones con clima trópico moderadamente fresco (Dercon 1998). Además las temperaturas medias, máximas y mínimas obtenidas de la estación de Palmas han sido corregidas para cada cuenca y así obtener un mejor ajuste de la temperatura ya que es el parámetro que predomina más en los cálculos de la evapotranspiración. (Ver anexo 4).

*Tabla 4. Factor de corrección para los datos de temperatura promedio, máxima y mínima mensual.*

Cuenca	Altitud Media (m.s.n.m)	Factor de corrección (adm)
1	2965	0.798
2	2440	0.986

### 3.5 Evapotranspiración

#### Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor), (Allen et al. 2006) La radiación solar directa, la temperatura ambiente del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación debido a que estos factores contribuyen energía para cambiar el estado de las moléculas de agua de líquido a vapor. Sin embargo cuando el estudio se realiza a una superficie de suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua de riego son otros factores que afectan el proceso de la evaporación.

#### Transpiración

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera (Allen et al. 2006). La radiación solar directa, la temperatura ambiente del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la transpiración, igual que la evaporación directa ya que también depende de la energía que estos factores le contribuyen.

#### Evapotranspiración

Se puede definir como evapotranspiración (ET) a la combinación de dos procesos diferentes por lo que el agua se pierde en una superficie por evaporación directa y por transpiración de la vegetación. Estos dos procesos trabajan de manera separados pero ocurren simultáneamente. La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie de cultivo o de suelo en unidades de altura de agua. (Allen et al. 2006)



La evapotranspiración es un factor primordial en la ecuación del balance hídrico por lo que hay que definir claramente la metodología usada recolectando y procesando adecuadamente los datos. A continuación se mostrara los métodos aplicados para el cálculo de la evapotranspiración siendo el más importante el método de Penman – Monteith ya que es el único método que abarca la mayor parte de los factores que intervienen en los procesos de evaporación y transpiración. Sin embargo se determina la evapotranspiración por el método de Thornthwaite y Blanney Criddle como una manera de verificar los datos obtenidos por el primer método.

### 3.5.1 Método de FAO: Penman - Monteith

Como resultado de una consulta de un panel de expertos llevada a cabo en mayo de 1990, el método Penman – Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia, ETo (Allen et al. 2006). La FAO presentó una definición inequívoca para superficie de referencia, la cual se muestra a continuación:

“Un cultivo hipotético de pasto, con una altura asumida de 0.12m, con una resistencia superficial fija de 7 s/m y un albedo de 0.23 “

Para aplicar este método es necesario instrumentos que determinen parámetros meteorológicos como son: la velocidad de viento, humedad relativa, temperatura del aire, horas de sol y precipitación que son parámetros fundamentales para los procesos de cálculo de la evapotranspiración aplicando el método de Penman – Monteith. El método de FAO Penman – Monteith se recomienda como el único método para determinar la evapotranspiración de referencia ETo. Sin embargo se aplicara otros métodos para corroborar los resultados obtenidos por este.

La ecuación combinada de Penman – Monteith es:

$$\lambda ETo = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

ETo: evapotranspiración de referencia (mm/día )

$R_n$ : radiación neta en la superficie del cultivo ((MJ)/(m<sup>2</sup> \* día ))

$r_s$  y  $r_a$  : resistencia superficial total y aerodinámica (s/m)

G: flujo del calor de suelo((MJ)/(m<sup>2</sup> \* día ))

T: temperatura media del aire a 2m de altura (°C )

$e_s$ : presión de vapor de saturación (kPa)

$e_a$ : presión real de vapor (kPa)

$(e_s - e_a)$ : déficit de presión de vapor (kPa)

$\Delta$ : pendiente de la curva de presión de vapor (kPa /°C)

$\gamma$ : Constante Psicrométrica

$\rho_a$  : densidad media del aire a presión constante

$c_p$ : calor específico del aire





A continuación se muestra la solución para cada parámetro en la ecuación de Penman – Monteith:

### 1) Resistencia aerodinámica, ( $r_a$ ):

Si se asume una altura constante de cultivo de 0.12m y una altura estandarizada para la medición de la velocidad del viento, temperatura y humedad de 2m, la resistencia aerodinámica  $r_a$  para la superficie de resistencia se convierte en :

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$u_2$ : es la velocidad de viento a 2m

### 2) Resistencia superficial (Total) ( $r_s$ )

Con una resistencia estomática,  $r_l$ , de una sola hoja con un valor de alrededor de 100 s/m y si se asume una altura de cultivo de 0.12m la resistencia superficial,  $r_s$  para el pasto será:

$$r_s = 70 \text{ s/m}$$

De la ecuación de la constante psicométrica y reordenando la ecuación se tiene:

$$c_p = \frac{Y \epsilon \lambda}{p} \quad \text{Ecuación 8}$$

Considerando la ley de los gases ideales:

$$\rho_a = \frac{p}{T_{Kv} * R} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde  $T_{Kv}$  (temperatura virtual), se puede sustituir por:

$$T_{Kv} = 1.01 * (T + 273) \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\frac{\rho_a c_p}{r_a} = \frac{Y \epsilon \lambda}{1.01 (T + 273) R (208)} u_2 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$\epsilon$ : cociente del peso molecular del vapor  $\frac{\text{agua}}{\text{aire}} = 0.622$

$R$ : constante universal de los gases = 0.287 kJ / kg K

Sustituyendo los valores en la ecuación 6 se tiene:





$$\frac{\rho_a c_p}{r_a} = 86400 \frac{Y(0.622)\lambda}{1.01(T + 273)(0.287)(208)} u_2$$

$$\frac{\rho_a c_p}{r_a} = Y \frac{900}{(T + 273)} u_2$$

Ecuación 12

Sustituyendo la ecuación de resistencia aerodinámica (Ecuación 7), la ecuación superficial (Ecuación 8) en la ecuación original de Penman – Monteith (Ecuación 6) se puede estimar una ecuación para determinar la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + Y \frac{900}{T+273} * u_2(e_s - e_a)}{\Delta + Y(1 + 0.34 u_2)}$$

Ecuación 13

Donde:

ET<sub>o</sub>: evapotranspiración de referencia (mm/día )

R<sub>n</sub>: radiación neta en la superficie del cultivo ((MJ/(m<sup>2</sup> \* día ))

R<sub>a</sub> : radiacion extraterrestre (mm/dia)

G: flujo del calor de suelo((MJ/(m<sup>2</sup> \* día ))

T: temperatura media del aire a 2m de altura (°C )

u<sub>2</sub> : velocidad del viento a 2m de altura (m/s)

e<sub>s</sub>: presión de vapor de saturación (kPa)

e<sub>a</sub>: presión real de vapor (kPa)

(e<sub>s</sub> – e<sub>a</sub>): déficit de presión de vapor (kPa)

Δ: pendiente de la curva de presión de vapor (kPa /°C)

Y: Constante Psicrométrica

Esta ecuación obtenida requiere de varios parámetros climatológicos y físicos. Algunos de estos parámetros se pueden obtener directamente de estaciones meteorológicas como datos de: humedad relativa, temperatura del aire, heliofanía, velocidad de viento y precipitación. Otros parámetros se pueden obtener con la ayuda de ecuaciones directas o empíricas utilizando los datos recopilados de la estación. A continuación se muestra como obtener estos parámetros climáticos requeridos para determinar la evapotranspiración.

## 1) Parámetros atmosféricos

### 1.1) Presión atmosférica (P)

La presión atmosférica, P, es la presión ejercida por el peso de la atmosfera terrestre. Para determinar este valor se puede emplear una simplificación de la ley de los gases ideales, a una temperatura atmosférica estándar de 20°C. Y se expresa como:

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065 z}{293} \right)^{5.26}$$

Ecuación 14

Donde:

P: Presion atmosférica (kPa)

z: Elevación sobre el nivel del mar (m)



## 1.2) Calor latente de vaporización ( $\lambda$ )

Calor latente de vaporización expresa la energía requerida para cambiar una masa de unidad de agua líquida a vapor bajo presión y temperatura constante (Allen et al. 2006). Para la ecuación simplificada de la FAO Penman – Monteith se considerará un valor constante de 2.45 MJ/kg correspondiente a una temperatura del aire de 20°C.

## 1.3) Constante psicométrica ( $\gamma$ )

Constante psicométrica ( $\gamma$ ), se expresa como:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

$\gamma$ : constante psicrométrica ( kPa /°C),

$P$  : presión atmosférica ( kPa),

$\lambda$ : calor latente de vaporización, 2,45 (MJ kg – 1),

$c_p$  : calor específico a presión constante, 1,013 x 10 – 3 (MJ kg – 1 °C – 1),

$\varepsilon$ : cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0,622.

## 2) Humedad del aire

### 2.1) Presión media de vapor de saturación ( $e_s$ ).

La presión media de vapor de la saturación depende de la temperatura, se expresa como:

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right) \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

$e^{\circ}(T)$  : presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T (kPa)

T : temperatura del aire (°C)

Debido a la característica no-lineal de la Ecuación 16, la presión media de saturación de vapor para un día, semana, década o mes, debe ser calculada como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima media y la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima media del aire para ese período, (Allen et al. 2006).

La presión media de vapor de saturación se expresa como:

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T \text{ max}) + e^{\circ}(T \text{ min})}{2} \quad \text{Ecuación 17}$$

### 2.2) Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ )

La pendiente de la curva a una temperatura dada se expresa como:



$$\Delta = \frac{4098 * (0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 273.3}\right))}{(T + 273.3)^2}$$

Ecuación 18

Donde

$\Delta$ : Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a la temperatura del aire

T (k Pa / °C)

T: temperatura del aire (°C)

### 2.3) Presión real de vapor ( $e_a$ ).

La FAO tiene varias opciones para determinar la presión real de vapor que se acomodan a diferentes datos recopilados. En este trabajo se calculará en función de datos de humedad relativa como se muestra a continuación:

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{\min}) \frac{HR_{\max}}{100} + e^\circ(T_{\max}) \frac{HR_{\min}}{100}}{2}$$

Ecuación 19

Donde:

$e_a$ : presión real de vapor (kPa)

$e^\circ(T_{\min})$ : presión de saturación de vapor a la temperatura mínima diaria (kPa)

$e^\circ(T_{\max})$ : presión de saturación de vapor a la temperatura máxima diaria (kPa)

HRmax: humedad relativa máxima (%)

HRmin : humedad relativa mínima (%).

## 3) Radiación

### 3.1) Radiación extraterrestre para periodos diarios ( $R_a$ )

La radiación extraterrestre para cada día del año y para diversas latitudes se puede estimar a partir de la constante solar, la declinación solar y la época del año (Allen et al. 2006).

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega))$$

Ecuación 20

Donde

$R_a$ : radiación extraterrestre (MJ/m<sup>2</sup> día)

$G_{sc}$ : constante solar = 0,082 MJ/m<sup>2</sup> min,

$d_r$ : distancia relativa inversa Tierra – Sol

$\omega_s$ : ángulo de radiación a la puesta del sol (rad)

$\varphi$ : latitud (rad)

$\delta$ : declinación solar (rad).

La distancia relativa inversa Tierra- sol se expresa como:

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$$

Ecuación 21

La declinación solar se expresa como:



$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365}J\right) - 1.39$$

Ecuación 22

Donde J es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre)

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol se expresa como:

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \tan(\delta))$$

Ecuación 23

### 3.2) Radiación solar ( $R_s$ )

Cuando no se cuenta con información sobre radiación solar se puede aplicar la ecuación de Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación y se expresa como:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a$$

Ecuación 24

Donde

$R_s$ : radiación solar o de onda corta [ $MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$ ],

n: duración real de la insolación [horas],

N : duración máxima posible de la insolación [horas],

$n/N$  : duración relativa de la insolación[-],

$R_a$ : radiación extraterrestre [ $MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$ ],

$a_s$  : constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados ( $n = 0$ ).

$a_s + b_s$ : fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados ( $n = N$ )

Se utilizará valores de  $a_s = 0.25$  y de  $b_s = 0.50$  debido a que no se dispone de valores reales de radiación solar y además no se ha realizado calibraciones previas a la ecuación mencionada.

### 3.3) Radiación solar en un día despejado ( $R_{so}$ )

Se calculará la radiación solar en días despejados, cuando  $n=N$  para el caso en donde los valores de  $a_s$  y  $b_s$  no estén disponibles y se expresa como:

$$R_{so} = (0.75 + 2 * 10^{-5} z) R_a$$

Ecuación 25

Donde

z: elevación de la estación sobre el nivel del mar (m)

### 3.4) Radiación neta solar o de onda corta ( $R_{ns}$ )

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

Ecuación 26

Donde

$R_{ns}$ : radiación neta solar o de onda corta [ $MJ/m^2\ día$ ],

$\alpha$  : coeficiente: de reflexión del cultivo, que es 0,23 para el cultivo hipotético de referencia [adimensional]



$R_s$ : radiación solar entrante [ MJ/m<sup>2</sup> día ]

### 3.5) Radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ )

La cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia, (Allen et al. 2006). Esta relación se expresa por la ley de Stefan-Boltzmann y se expresa como:

$$R_{nl} = \sigma \left( \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad \text{Ecuación 27}$$

El termino  $(0.34 - 0.14\sqrt{e_a})$  expresa la corrección para la humedad del aire y el efecto de la nubosidad se expresa por  $\left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$ .

Donde:

$R_{nl}$  : Radiación neta de onda larga (MJ/ m<sup>2</sup> día),

$\sigma$ : constante de Stefan – Boltzmann ( $4,903 \times 10^{-9}$  MJ/ K<sup>4</sup> m<sup>2</sup> día],

$T_{max,K}$  : temperatur a máxima absoluta durante un periodo de 24 horas ( $K = ^\circ C + 273,16$ ),

$T_{min,K}$  : temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas ( $K = ^\circ C + 273,16$ ),

$e_a$ : presión de vapor real (kPa),

$\frac{R_s}{R_{so}}$  : radiación relativa de onda corta (valores  $\leq 1,0$ ),

$R_s$ : radiación solar medida o calculada (Ecuación 35) [MJ/ m<sup>2</sup> día],

$R_{so}$ : radiación en un día despejado (Ecuación 36 o 37) [MJ /m<sup>2</sup> día]

### 3.6) Radiación neta ( $R_n$ )

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{Ecuación 28}$$

### 3.7) Flujo del calor del suelo (G)

Como la magnitud del flujo de calor bajo la superficie de referencia es relativamente pequeña, esta puede ser ignorada y entonces. (Allen et al. 2006).

$$G_{dia} = 0 \quad \text{Ecuación 29}$$

La fórmula de Penman – Monteith ha sido reportada por ambos equipos de investigación (ASCE y Europeo) como aquella que produce resultados relativamente exactos y consistentes tanto en climas áridos como en húmedos (Allen et al. 2006).

### 3.5.2 Método Thornthwaite

Charles Thornthwaite en 1948 propuso un método para determinar la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes.(Allen et al. 2006)

Pasos para determinar la evapotranspiración según Thornthwaite:



- 1) Se calcula un índice de calor mensual (i) a partir de la temperatura media mensual (t):

$$i = \frac{t^{1.514}}{5} \quad \text{Ecuación 30}$$

- 2) Se calcula el índice de calor anual (I) sumando los 12 valores de i:

$$I = \sum i \quad \text{Ecuación 31}$$

- 3) Se calcula la ETP mensual sin corregir :

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 16 \left( \frac{10 t}{I} \right)^a \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde

$ETP_{\text{sin corregir}}$  = ETP mensual en *mm/mes* para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas).

t = temperatura media mensual, °C

I = índice de calor anual

$$a = 675 * 10^{-9} I^3 - 771 * 10^{-7} I^2 + 1792 * 10^{-5} I + 0.49239$$

- 4) Corrección para el número de días del mes y el número de horas de sol:

$$ETP = ETP_{\text{sin corregir}} * \frac{N}{12} \frac{d}{30} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde

ETP = evapotranspiración potencial corregida

N = número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud

d = número de días del mes

### 3.5.3 Método Blannay - Criddle

Blannay y Criddle propusieron un método para determinar la evapotranspiración en función de la temperatura media mensual, el porcentaje de horas luz por mes con respecto al total anual y las características del cultivo (López 1998) y se expresa como:



$$ET = K * F$$

Ecuación 34

Donde

ET = evapotranspiración real total del cultivo expresada como lámina (cm).

K = coeficiente total de ajuste que depende del cultivo y de la ubicación de la zona de estudio.

$$F = \sum_i^n f$$

Ecuación 35

$$f = \left( \frac{T + 17.8}{21.8} \right) * P * Duracion\_mes$$

Ecuación 36

T = temperatura media mensual (°C)

$$Duración\_mes = \frac{Número\_días\_considerados}{Número\_días\_del\_mes}$$

P = porcentaje de horas luz en el día en relación con el total anual(%)

Phelan realizó una modificación a la ecuación de Blanney-Criddle donde introdujo un coeficiente por temperatura a la ecuación y se expresa como:

$$K_t = 0.031144 * T + 0.2396$$

Ecuación 37

Donde

T = temperatura media mensual (°C)

Obteniendo una nueva ecuación para determinar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).

$$ET_o = F * K_t$$

Ecuación 38

Posteriormente se determinan los valores de los coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>) (Ver anexo 6) y el valor de un coeficiente global de cultivo (K<sub>G</sub>) (Ver anexo 7) para pastos. Ya que este cultivo representa el 95% aproximadamente del área del macro deslizamiento y finalmente se calcula el valor final de la evapotranspiración, con la siguiente expresión:

$$ET_p = ET_p' * \frac{K_G}{K'}$$

Ecuación 39

Donde

$$ET_p' = ET_o * K_c$$

$$K' = \frac{ET_p'}{\sum_1^n f}$$



El coeficiente único  $K_c$  incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo.

### 3.6 Caudal

Es usual en este tipo de proyectos no encontrar información suficiente y/o encontrarlas en otras cuencas, por ello se ha optado realizar una trasposición de la información de la cuenca Collay (ver anexo 5) ubicada aproximadamente a 5 km de la cuenca de estudio.

#### 3.6.1 Trasposición de caudales

La trasposición de caudales consiste en hallar un coeficiente que permita llevar la información de caudales hasta el lugar de la toma (Ortiz Flórez 2011), considerando la similitud de las cuencas; se determina por la siguiente expresión:

$$C = \frac{A_C * P_C}{A_P * P_P} \quad \text{Ecuación 2}$$

*Donde*

*$A_C$ : Área de la cuenca sin informacion*

*$P_C$ : Precipitacion media de la cuenca sin informacion*

*$A_P$ : Área de la cuenca con informacion*

*$P_P$ : Precipitacion media de la cuenca con informacion*

Con el coeficiente de trasposición de caudales, se obtiene el caudal medio de la cuenca sin información.

$$Q_c = C * Q_p \quad \text{Ecuación 3}$$

*Donde*

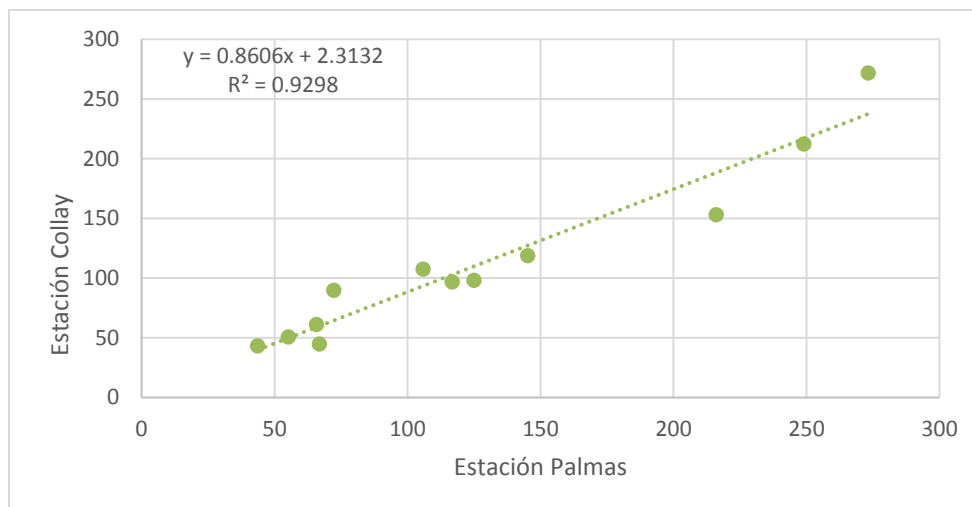
*$Q_c$ : Caudal medio de la cuenca sin informacion*

*$Q_p$ : Caudal medio de la cuenca con informacion*

*$C$ : Coeficiente de trasposición.*

Se debe determinar la relación que existe entre las precipitaciones de la cuenca de Collay y la cuenca de Palmas. Para ello se realizó un análisis de la correlación lineal de la series de datos entre las dos cuencas.





*Figura 13. Análisis de correlación de la precipitación en un año hidrológico de la Estación Palmas y la Estación Collay.*

En la figura 3 se puede observar el coeficiente de Pearson  $R^2$  mayor a 0.9, que implica una buena correlación entre las dos estaciones.

*Tabla 5. Área de aporte de la cuenca Collay y de las cuencas en Chalacay.*

Área de aporte (ha)	
Collay	23936,46
Cuenca 1	943.31
Cuenca 2	131.64

*Tabla 6. Coeficiente de trasposición de las cuencas en Chalacay.*

Coeficiente de trasposición	
Cuenca 1	0.0394
Cuenca 2	0,0055

### 3.6.2 Aforos o medición de caudales

Es primordial el conocimiento de la variación del caudal que circulan por una determinada sección de un cauce natural para realizar un estudio hidrológico. Es probable que algunas veces no se pueda contar con información suficiente o simplemente no exista para elaborar un estudio hidrológico coherente, razón por la que habrá que recolectar datos propios a partir de mediciones instantáneas del caudal. En la determinación de caudales debe adoptarse la forma más práctica de aforar dependiendo del tipo de descarga que se tenga.



Metodología de trabajo:

- 1) Se efectuó una gira de inspección a la zona de estudio para conocer las características del lugar, identificar puntos de control y determinar el equipo a utilizar.
- 2) Se determinó un único sistema de drenaje natural para cada cuenca, que drena sus aguas al embalse a través de una quebrada.

*Tabla 7. Coordenadas UTM de los puntos de control para cada cuenca en Chalacay.*

	Coordenadas UTM	
	Norte	Este
Cuenca 1	9702454.76	765062.84
Cuenca 2	9701831,88	764218,65

- 3) Se determinó el método para aforar en cada cuenca: Debido a la poca profundidad y caudal de la corriente en la cuenca 2, se optó por aforar con el método volumétrico (método empírico), ya que este método es el más sencillo y confiable para caudales pequeños. Para la cuenca 1 se utilizó el método velocidad- sección (método mecánico y electrónico) debido a que el caudal en esta cuenca se asemeja a un río pequeño.
- 4) Se adecuó el sitio de aforo para evitar pérdida de la muestra en el momento de aforar, se retiró todos los obstáculos (troncos, piedras, afluentes con remansos entre otros) y represamientos que causaban la acumulación de sólidos.
- 5) La medición del caudal se realizó de forma manual utilizando un cronómetro, un balde aforado y un tubo de 6" que capto toda el agua para la cuenca 2 y para la cuenca 1 se utilizó un molinete de una rueda hecha de seis tazas cónicas, las cuales rotan libremente con la corriente alrededor de un eje vertical dentro del yugo.
- 6) Cuenca 1: El molinete realiza la medición de la velocidad (V) a partir del número de revoluciones (n) que la canastilla gira alrededor de su propio eje, provocado por la velocidad del agua en ese punto. Para determinar la velocidad se utilizó la siguiente fórmula:

$$V = 0.68279n + 0.01133$$

Ecuación 4

Donde:

V: Velocidad en el agua (m/s)  
n: Número de revoluciones

- 7) Cuenca 2: Se tomó una muestra cualquiera (V) en un tiempo transcurrido (t) desde que se introduce la descarga hasta que se retiró de ella; la relación de estos dos parámetros permite conocer el caudal (Q) en ese instante de tiempo (Ortiz Florez 2011). Para determinar el caudal se utilizó la siguiente ecuación:



$$Q = V/t$$

Ecuación 5

Donde:

Q: Caudal (lt/s).

V: Volumen (lt).

T: Tiempo (s)

- 8) Se realizó ocho aforos en cada punto de control durante el mes de octubre para obtener un promedio del caudal que circula por las cuencas.

### 3.7 Diseño de vertederos

La hidráulica es una ciencia que necesita de la experimentación para analizar y comprender las características del comportamiento del agua. Existen varias estructuras hidráulicas llamados medidores o aforadores cuyos diseños se basan en los principios hidráulicos de orificios, vertederos y secciones críticas para la medición de caudales. En esta investigación se enfocará solo en el diseño de vertederos como estructura hidráulica.

El vertedero ha sido definido por Balloffet como “una abertura o escotadura de contorno abierto, practicada en la pared de un depósito, o bien en una barrera colocada en un canal o río, y por el cual escurre o rebasa el líquido contenido en el depósito, o que circula por el río o canal”.(Brazales Puga 2010). Es decir los vertederos son simples aberturas sobre las que se desliza un líquido y se suelen usar para medir caudales en conductos libres.

Los vertederos se clasifican según la función que deban desempeñar, estos pueden ser: triangulares o rectangulares, trapezoidales o combinados de pared delgada o gruesa. Para medir gastos menores de 114l/s, el vertedero triangular es más preciso que el rectangular, puesto que la sección transversal de la lámina vertiente muestra de manera notoria la variación en altura y, para medir caudales mayores de 114l/s es recomendable los vertederos rectangulares. (Ortiz Florez 2011).

Para determinar el caudal de diseño para el dimensionamiento de los vertederos se utilizó caudales medios mensuales máximos mayorados de una serie histórica de 30 años obtenido por el método trasposición de caudales (Ver anexo 8 y 9). El periodo de retorno para estas estructuras será de 10 años de acuerdo a recomendaciones del MTOP, de esta manera se garantiza que las obras tengan la capacidad suficiente para evacuar los caudales esperados en eventos de gran intensidad.

A continuación se muestra las pautas a seguir para el diseño de vertederos

#### 3.7.1 Dimensiones

##### 3.7.1.1 Vertedero triangular

A continuación se presenta la deducción de la formula general de descarga de un vertedero triangular. Para demostrar la fórmula de descarga en un vertedero triangular de pared delgada se plantea la siguiente figura:

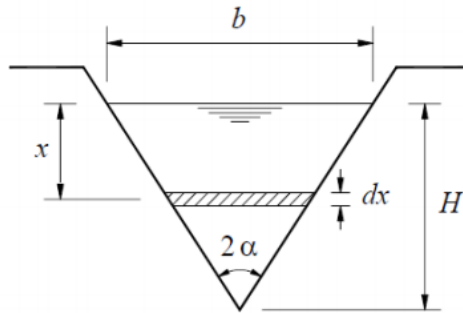


Figura 14. Esquema para la deducción de la fórmula de descarga en un vertedero triangular.

Se considera el gasto a través de la pequeña franja elemental

### Área

Aplicando semejanza de triángulos la longitud de la franja es:

$$\frac{b(H-x)}{H}$$

Por lo tanto

$$A = \frac{b(H-x)}{H} dx$$

Ecuación 47

### Velocidad

La relación entre la descarga y la altura sobre la cresta del vertedero puede obtenerse matemáticamente haciendo las siguientes suposiciones del comportamiento del flujo:

- Aguas arriba del vertedero el flujo es uniforme y la presión varía con la profundidad de acuerdo con la hidrostática ( $p = \rho gh$ ).
- La superficie libre permanece horizontal hasta el plano del vertedero y todas las partículas que pasan sobre el vertedero se mueven horizontalmente (en realidad la superficie libre cae cuando se aproxima al vertedero).
- La presión a través de la lámina de líquido o napa que pasa sobre la cresta del vertedero es la atmosférica.
- Los efectos de la viscosidad y de la tensión superficial son despreciables.

Por lo tanto aplicando la ecuación de Bernoulli entre dos puntos sobre una misma línea de corriente, se obtiene:



$$Z1 + \frac{P1}{\rho g} + \frac{V1^2}{2g} = Z2 + \frac{P2}{\rho g} + \frac{V2^2}{2g}$$

Considerando la franja como un orificio, desprendiendo la velocidad de aproximación  $V1 = 0$  y según la suposición 3,  $\frac{P2}{\rho g} = 0$  se tiene:

$$V^2 = \sqrt{2g(x)} \quad \text{Ecuación 48}$$

Donde:

$$x = Z1 + \frac{P1}{\rho g}$$

Por lo tanto el caudal en la franja es:

$$dQ = \frac{b}{H} (H - x) \sqrt{2gx} dx$$

Integrando entre  $x=0$  y  $x=H$  se obtiene:

$$\int_0^H dQ = \int_0^H \frac{b}{H} \sqrt{2g} (Hx^{\frac{1}{2}} - x^{\frac{3}{2}}) dx$$

Pero  $b = 2H \tan \alpha$

$$Q = c \frac{8}{15} \tan \alpha \sqrt{2g} H^{\frac{5}{2}} \quad \text{Ecuación 49}$$

Donde:

c: coeficiente de descarga

Q: caudal ( $m^3/s$ )

$\alpha$ : Ángulo interno del vertedero ( $^\circ$ )

h: Carga hidráulica del vertedero (m)

El coeficiente de descarga compensa fenómenos tales como las pérdidas de carga entre las secciones de aforo y de control, la falta de uniformidad de la distribución de la velocidad y de la curvatura de las líneas de corriente entre estas dos secciones.

$$c = 0.565 + \frac{0.0087}{h^{0.5}} \quad \text{Ecuación 50}$$

### Ancho del canal

Como la descarga depende de la potencia  $5/2$  de la carga se puede tener mayor precisión en la medida de caudales pequeños. Así mismo, en los vertederos triangulares es muy pequeña la influencia de la altura del umbral y de la velocidad de llegada. Para ello se requiere que el ancho del canal de aproximación sea igual o mayor a 5 veces la carga del vertedero.

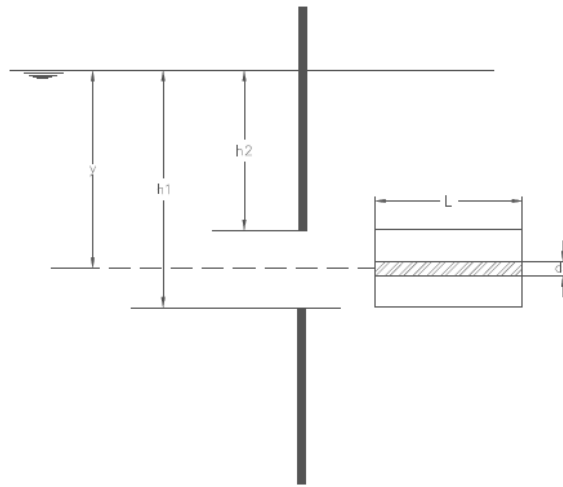
$$B \geq 5H \quad \text{Ecuación 51}$$

## Ángulo interno

En la práctica común, únicamente se emplean los que tiene forma de isósceles y los más usuales son los de 90°.

### 3.7.1.2 Vertedero rectangular

A continuación se presenta la deducción de la fórmula general de descarga de un vertedero rectangular. En la figura 25 Se muestra parcialmente un estanque cuyas paredes hay un orificio rectangular de ancho L.



*Figura 15. Esquema para la deducción de la fórmula de descarga en un vertedero rectangular.*

Para efectos de cálculo se considera que en el orificio hay una franja de área elemental de ancho L y de espesor Dy a través de la cual pasa el siguiente caudal:

$$dQ = VdA = vLdy \quad \text{Ecuación 52}$$

Siendo V la velocidad correspondiente. Para el cálculo de esta velocidad se aplica el teorema de Bernoulli como se explicó anteriormente en el diseño de un vertedero triangular.

$$V = \sqrt{2gy}$$

Por lo tanto,

$$dQ = \sqrt{2gy} Ldy$$

Integrando se obtiene el caudal a través del orificio





$$Q = \int_{h_2}^{h_1} \sqrt{2gy} L dy$$

Esta fórmula es para un orificio. Para un vertedero debe darse que  $h_2=0$ . Si, además se denomina  $H$  a  $h_1$ , que es la carga, se tiene:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{3/2} \quad \text{Ecuación 53}$$

La descarga real se obtiene aplicando un coeficiente de descarga y se llega a:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L_c H^{3/2} \quad \text{Ecuación 54}$$

Que es la ecuación de descarga característica de los vertederos rectangulares.

### 3.7.2. Instalación y operación.

Para la instalación y operación de vertederos se debe tomar ciertas medidas:

- ✓ Verificar que la lámina de líquido quede perfectamente aireada, ya que en todo su contorno la presión debe ser igual a la atmosférica.
- ✓ Si las condiciones de aproximación del flujo no son tranquilas debe colocarse elementos disipadores de energía como pantallas, ladrillos, huecos, mallas, etc.

## CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Delimitación del macro deslizamiento

Analizando algunos criterios para la identificación de terrenos inestables como se explicó en el capítulo anterior se delimitó el macro deslizamiento en función de ellos obteniendo un área aproximada de 87ha (ver figura 26).

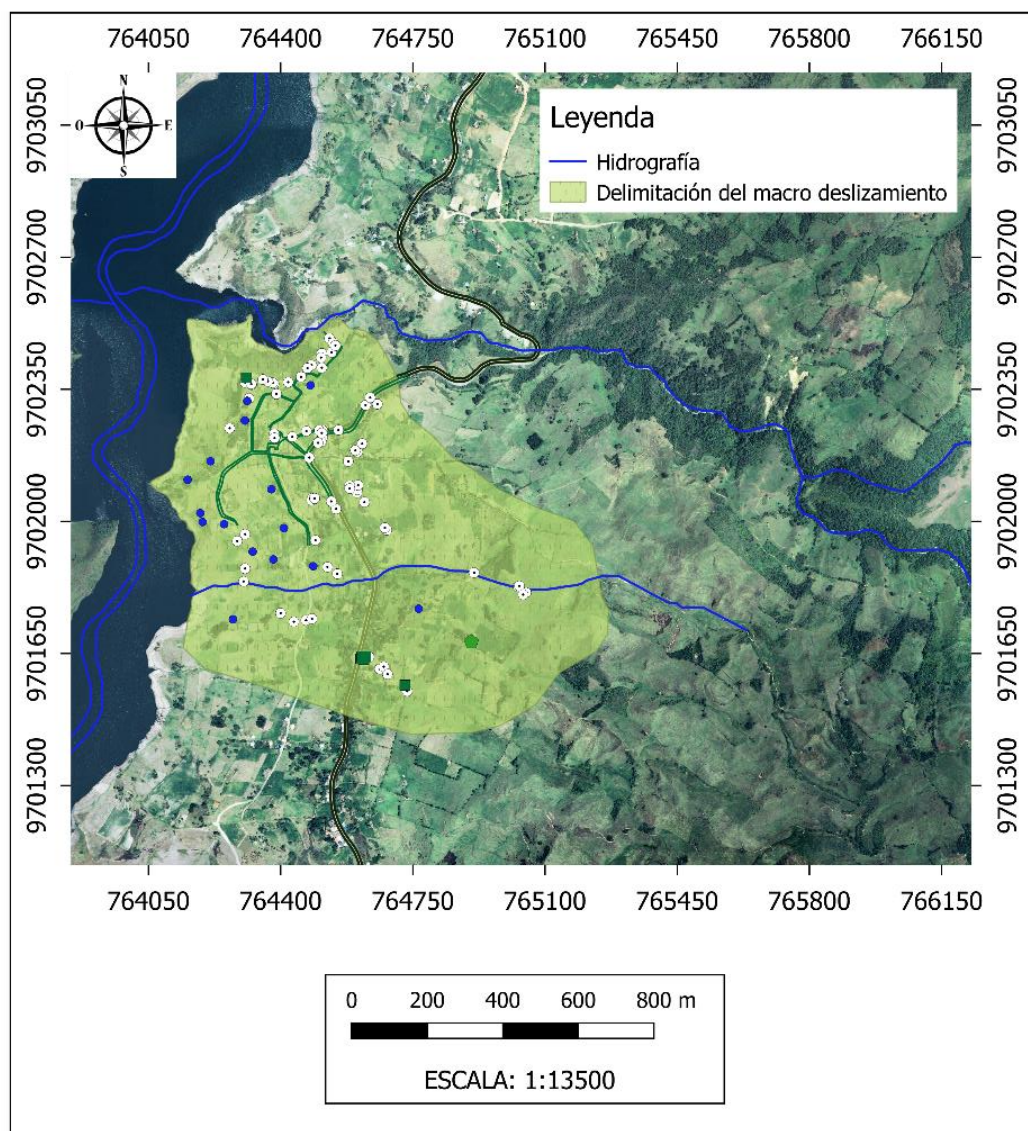


Figura 16. Visualización de la ortografía del SIG-TIERRAS tomadas en el año 2009.  
Delimitación de la zona crítica del macro deslizamiento Chalacay.

En el año de 1997, personal de la consultora de SWECO y BOTCONSULT, establece que el macro deslizamiento de Chalacay consta con un área de 7 ha. Luego en el año del 2007, personal del Consorcio Gerencia Mazar dimensionan al macro deslizamiento con 15.7 ha y finalmente la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP en el año 2012, establecen un área de 18 ha. De la misma manera se realizó un estudio al macro deslizamiento en el año 2016 donde se delimitó el área en función de aspectos geológicos y se verificó que la tasa de crecimiento del deslizamiento es de 17.25ha/año en los últimos 4 años.

Acotando que el efecto del embalse de Mazar hacia el macro deslizamiento ha causado un deterioro significativo a los taludes de Chalacay como se muestra a continuación.



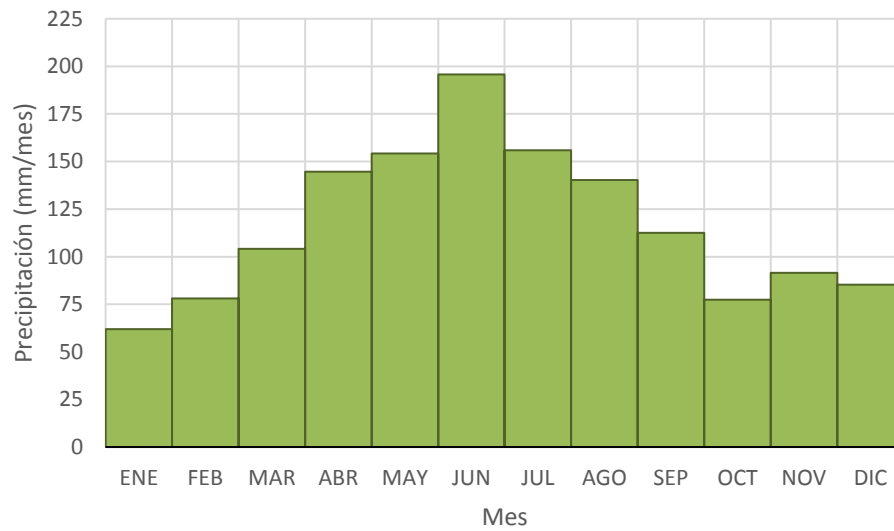
*Figura 17. Vista panorámica del deterioro de los taludes en Chalacay. (Latorre, 2005), fotografía tomada antes del llenado del embalse. (CELEC EP, 2012).*

La línea roja en la figura 27 representa los bordes del macro deslizamiento actual y la línea azul representa el nivel del embalse.

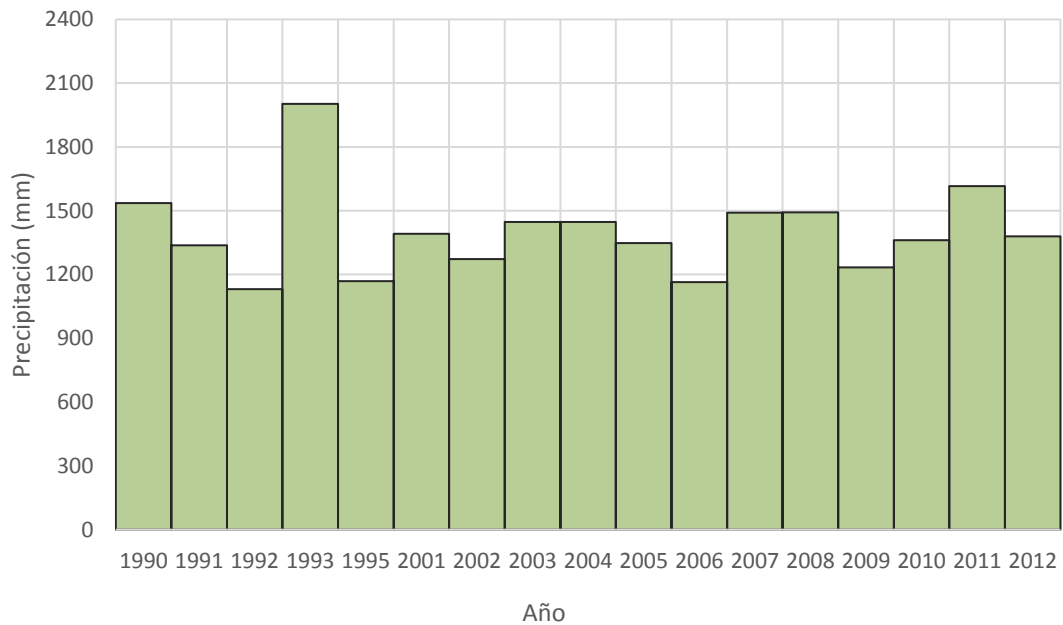
A continuación se muestra los resultados de las variables que intervienen en el balance hídrico, para luego analizarlas en conjunto y así obtener una aproximación del almacenamiento de agua en el macro deslizamiento.



## 4.2 Precipitación



*Figura 18. Precipitación promedio mensual (mm) para la estación de Palmas desde enero de 1990 hasta diciembre de 2012.*



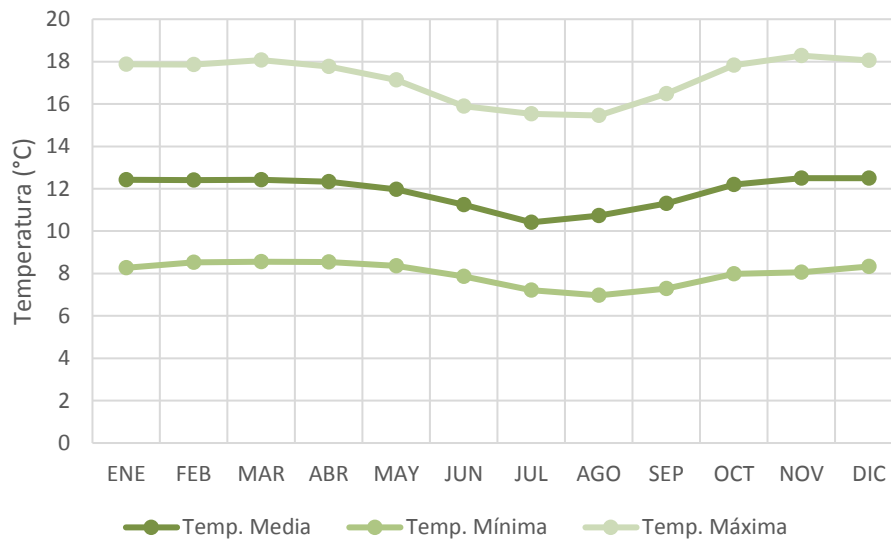
*Figura 19. Precipitación anual (mm) para la estación de Palmas desde 1990 hasta el 2012.*



El clima en el macro deslizamiento está determinado por el régimen de humedad del Oriente, de manera que los meses de mayo, junio y julio son los meses más lluviosos. Las lluvias se caracterizan por ser muy intensas. Prácticamente llueve todos los meses del año, sin embargo los meses de enero y octubre son los meses menos lluviosos. Además hay una estación de crecimiento de 12 meses y un periodo húmedo de 7 a 12 meses, lo que significa que el clima no presenta limitaciones para el crecimiento de las plantas. (Dercon 1998)

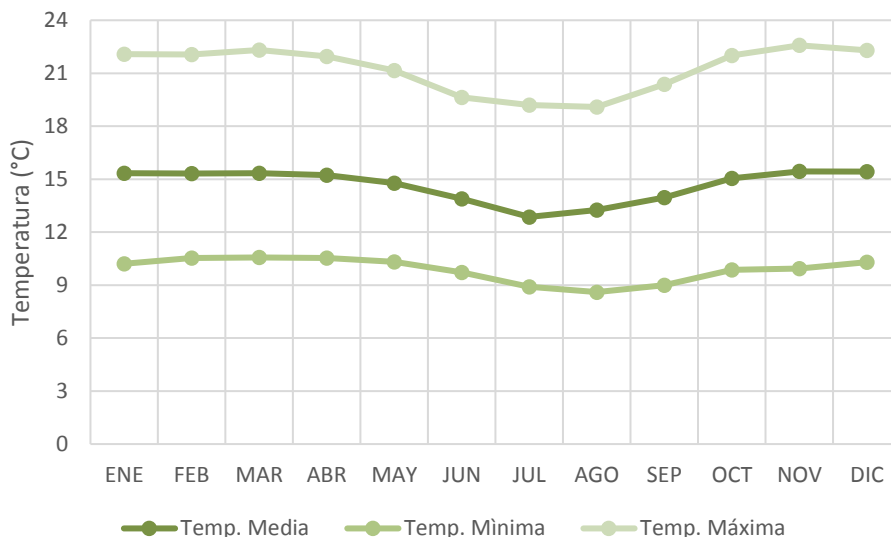
Según los datos de precipitación de la estación de Palmas, y como lo muestran los gráficos anteriores el año hidrológico más lluvioso concuerda con el desastre sucedido en el cerro Tamuga en el año de 1993. En general la precipitación total anual fluctúa entre 1000 y 2000 mm.

### 4.3 Temperatura



*Figura 20. Temperatura media mensual, máxima y mínima corregida para la cuenca 1 desde enero de 1990 hasta diciembre de 2012.*





*Figura 21. Temperatura media mensual, máxima y mínima corregida para la cuenca 2 desde enero de 1990 hasta diciembre de 2012.*

Se puede notar en las figuras anteriores que los meses más cálidos corresponden a noviembre y diciembre, y los menos calientes a los meses de agosto y julio.

En general la temperatura media mensual de la zona oscila entre los 10.4 y 12.5 °C para la cuenca 1 y para la cuenca 2 oscila entre 15.4 y 19.9 °C; la temperatura ambiente mantiene un promedio de 11.9 °C anual para la cuenca 1 y de 14.7 °C para la cuenca 2 sin presentar variaciones representativas mensuales.

En cuanto a temperaturas máximas y mínimas, en la cuenca 1 el rango oscila entre 19.1 y 22.6 las máximas y, las mínimas entre 8.6 y 10.6 °C En tanto la cuenca 2 el rango de temperaturas máximas oscila entre 18.3 y 15.5 °C y las mínimas entre 7 y 8.6 °C.



## 4.4 Evapotranspiración

### 4.4.1 Método Penman – Monteith

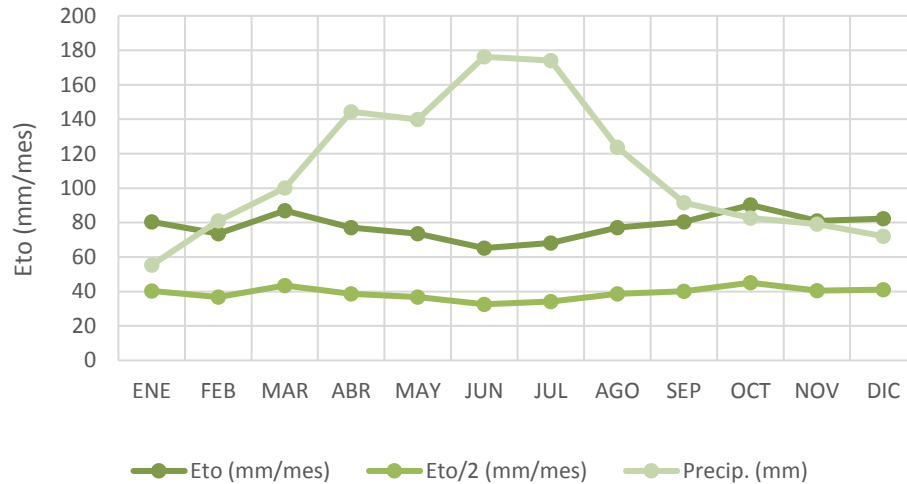


Figura 22. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Penman – Monteith.

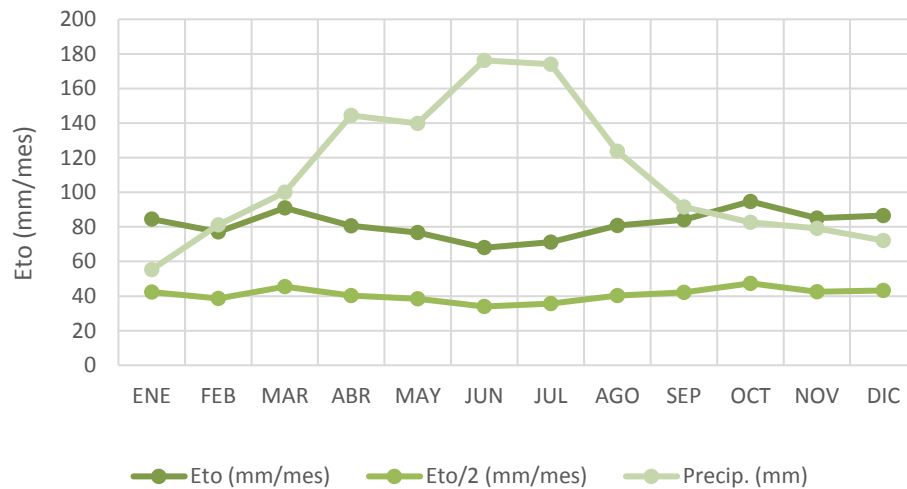
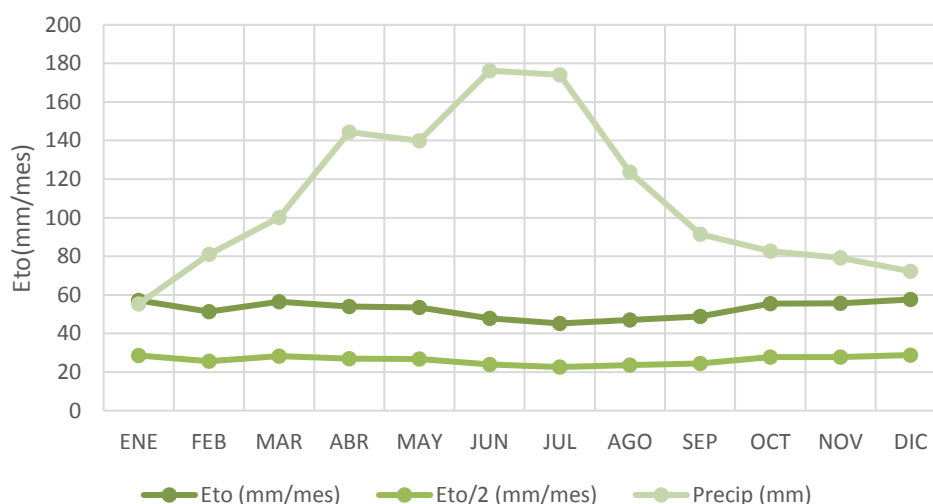


Figura 23. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Penman – Monteith.

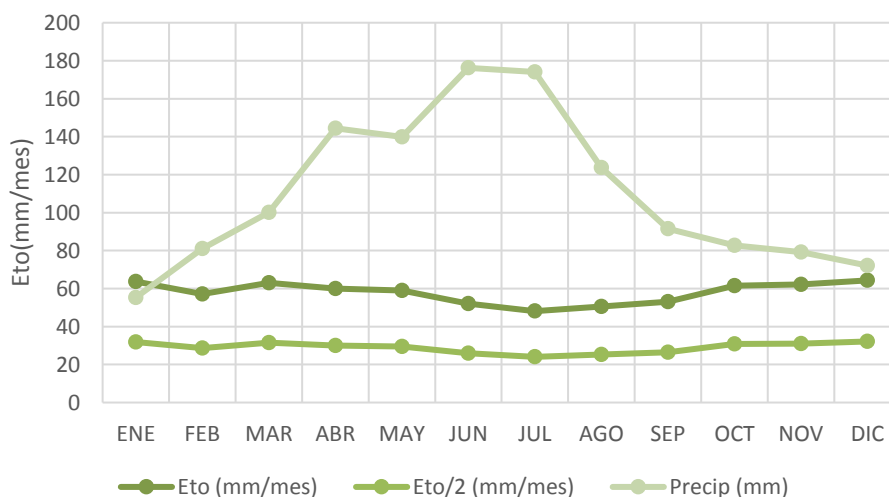


Se puede notar en las figuras anteriores que los meses de mayor evapotranspiración corresponden a octubre y marzo y, los de menor evapotranspiración corresponden a los meses de junio y julio. En general la evapotranspiración en la zona oscila entre 65.2 y 90.2 mm/mes para la cuenca 1 y para la cuenca 2 entre 69.9 y 94.8 mm/mes. Además se puede observar que los meses de mayor precipitación corresponden a los meses de menor evapotranspiración en la zona de estudio.

#### 4.4.2 Método Thornthwaite



*Figura 24. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Thornthwaite.*

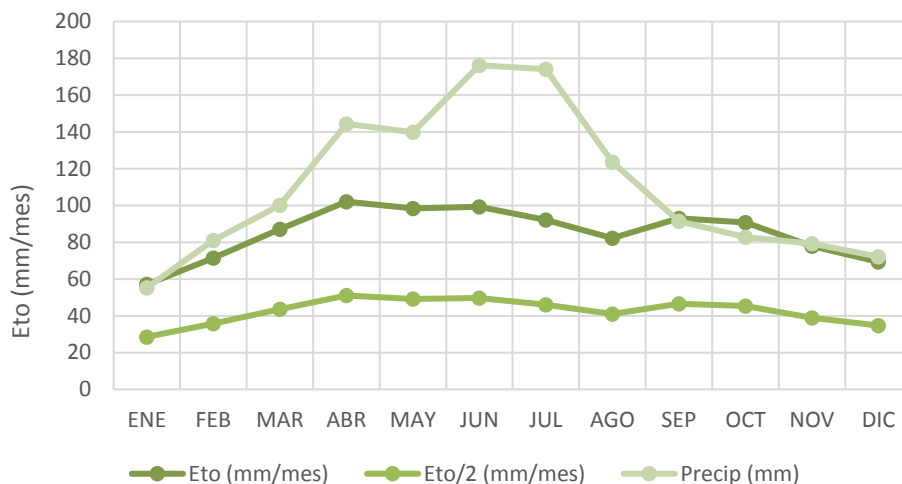


*Figura 25. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Thornthwaite.*

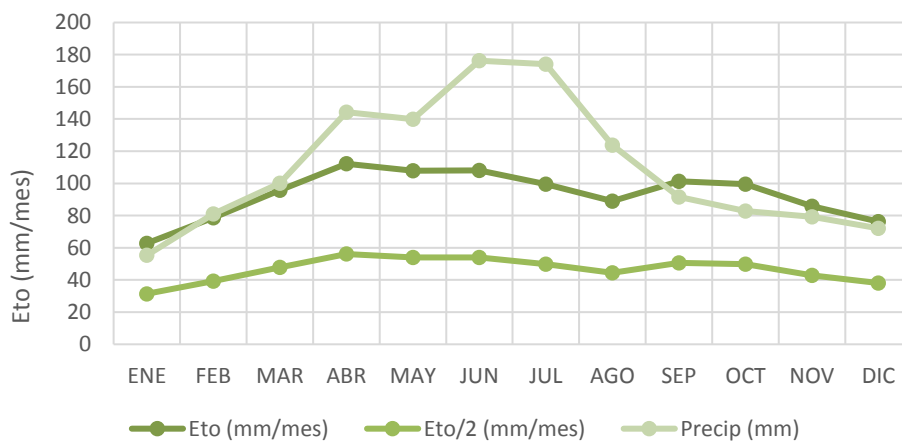


Se puede notar en las figuras anteriores que los meses de mayor evapotranspiración corresponden a diciembre y enero y, los de menor evapotranspiración corresponden a los meses de junio, julio y agosto. En general la evapotranspiración en la zona oscila entre 45.2 y 57.6 mm/mes para la cuenca 1 y para la cuenca 2 entre 48.1 y 64.3 mm/mes. Además se puede observar que los meses de mayor precipitación corresponden a los meses de menor evapotranspiración en la zona de estudio.

#### 4.4.3 Método Blanney y Criddle



*Figura 26. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Blanney y Criddle.*



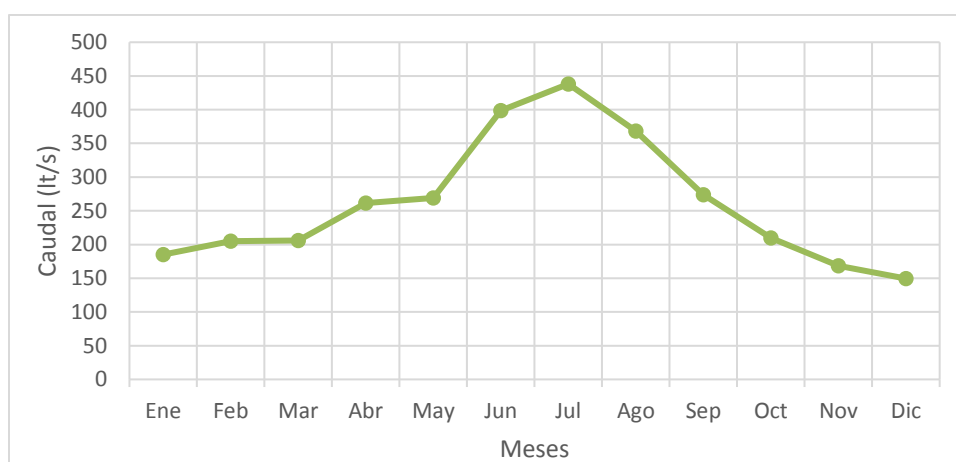
*Figura 27. Evapotranspiración de referencia con valores medios mensuales para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 1990 a diciembre del 2012, aplicando el método Blanney y Criddle.*



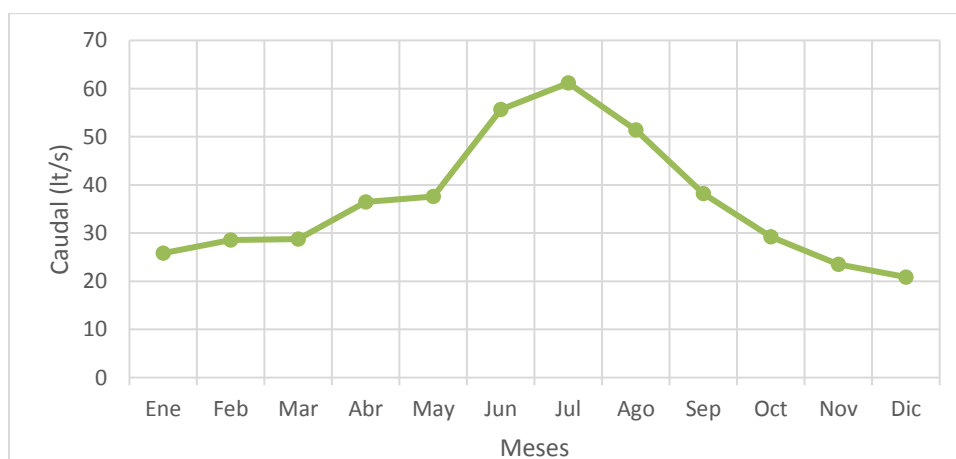
Se puede notar en las figuras anteriores que los meses de mayor evapotranspiración corresponden a abril y junio y, los de menor evapotranspiración corresponden a los meses de enero y diciembre. En general la evapotranspiración en la zona oscila entre 57 y 102 mm/mes para la cuenca 1 y para la cuenca 2 entre 62.8 y 112.1 mm/mes. Además se puede observar que los meses de mayor precipitación corresponden a los meses de menor evapotranspiración en la zona de estudio.

#### 4.5 Caudal

Para determinar los caudales en el macro deslizamiento Chalacay se aplicó el método trasposición de caudales como se muestra en el capítulo anterior, esta variable es fundamental en el estudio del balance hídrico y para el diseño de vertederos de cada sistema de drenaje natural en cada cuenca.



*Figura 28. Caudal medio mensual (lt/s) de la cuenca 1 en Chalacay, desde enero de 1965 hasta diciembre de 2008.*



*Figura 29. Caudal medio mensual (lt/s) de la cuenca 2 en Chalacay, desde enero de 1965 hasta diciembre de 2008.*





Se puede notar en las figuras anteriores que los meses con mayor caudal corresponden a junio, julio y agosto y, los de menos caudal corresponden a los meses de noviembre y diciembre. En general el caudal de la zona oscila entre los 149.5 y 438.10 lt/s para la cuenca 1 y para la cuenca 2 entre 20.9 y 61.15 lt/s. Estos valores serán utilizados posteriormente para determinar el balance hídrico de cada cuenca.

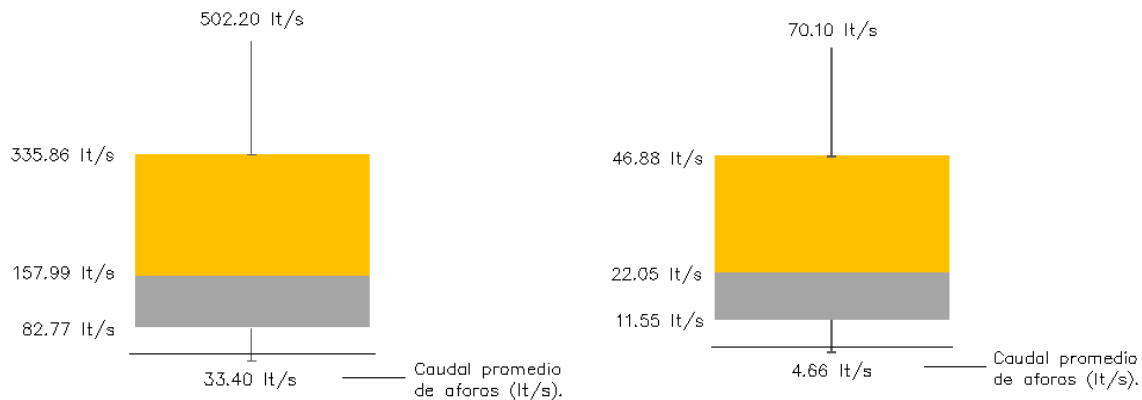
Debido al tiempo y al costo que se requiere realizar un análisis de aguas subterráneas (niveles freáticos) por medio de perforaciones y por la escasez de instrumentación para obtener valores de infiltración básica de suelos, profundidad de las raíces extractoras del agua, la capacidad de campo, el siguiente estudio carece de esta investigación.

#### 4.6 Diagrama de caja y bigote

Como se explicó en el capítulo anterior, el diagrama de caja y bigote es un tipo de gráfico que permite interpretar los datos para las variables que intervienen en el balance hídrico y aplicando el criterio de John Tukey 1977 (Ledesma, Molina, and Young 2007) se determinará la consistencia de los mismos.

El caudal promedio obtenido por los aforos en el mes de octubre para la cuenca 1 es de 37.5 lt/s y para la cuenca 2 es de 4.79 lt/s. (Ver anexo 9 y 10)

##### 4.6.1 Método trasposición de caudales



*Figura 30. Diagrama de caja y bigote para los caudales de la cuenca 1 (a) cuenca 2 (b) obtenidos por el método de trasposición de caudales (1965-2008).*

Se puede notar en las figuras anteriores que no existen valores atípicos para los caudales obtenidos por el método de trasposición de caudales y además el caudal promedio obtenidos por los aforos no es un valor atípico y se encuentra por debajo del mínimo para la cuenca 1 y por debajo de la mediana para la cuenca 2. De manera que estos valores serán utilizados para el cálculo del balance hídrico.



#### 4.6.2 Método FAO: Penman Monteith

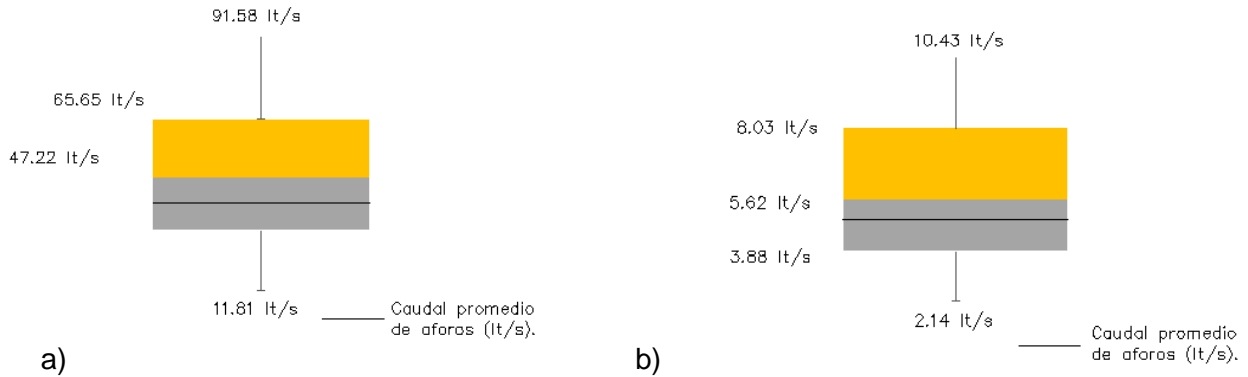


Figura 31. Diagrama de caja y bigote para los caudales de la cuenca 1 (a) cuenca 2 (b) obtenidos por el método FAO: Penman Monteith (1990-2012).

Se puede notar en las figuras anteriores que no existen valores atípicos para los caudales obtenidos por el método de Penman Monteith y además el caudal promedio de aforos no es un valor atípico y se encuentra por debajo de la mediana para la cuenca 1 y 2 de la zona de estudio. De manera que estos valores serán utilizados para el cálculo del balance hídrico.

#### 4.6.3 Método Thornthwaite

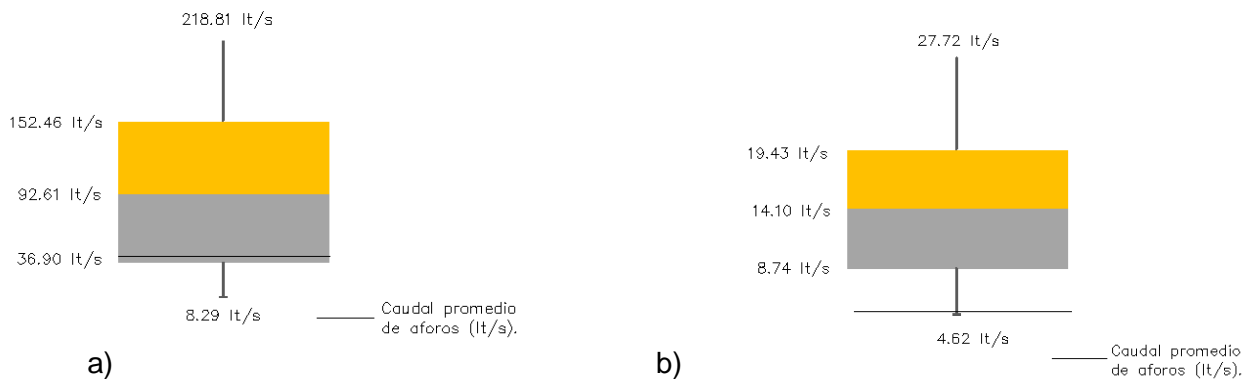


Figura 32. Diagrama de caja y bigote para los caudales de la cuenca 1 (a) cuenca 2 (b) obtenidos por el método Thornthwaite. (1990-2012).

Se puede notar en las figuras anteriores que no existen valores atípicos para los caudales obtenidos por el método de Thornthwaite y además el caudal promedio de aforos no es un valor atípico y se encuentra por debajo de la mediana para la cuenca 1 y 2 de la zona de estudio. De manera que estos valores serán utilizados para el cálculo del balance hídrico.



#### 4.6.4 Método Blanney – Criddle

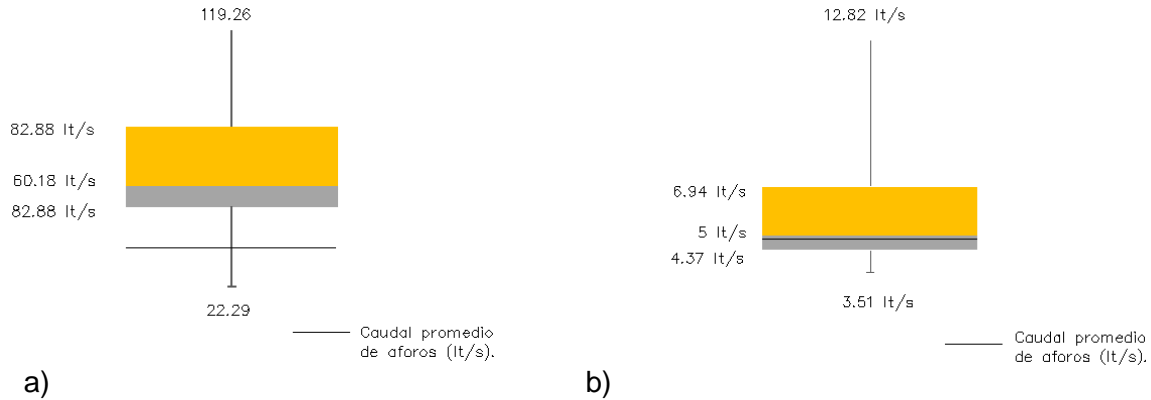


Figura 33. Diagrama de caja y bigote para los caudales de la cuenca 1 (a) cuenca 2 (b) obtenidos por el método Blanney – Criddle. (1990-2012).

Se puede notar en las figuras anteriores que no existen valores atípicos para los caudales obtenidos por el método de Blanney – Criddle y además el caudal promedio de afloros no es un valor atípico y se encuentra por debajo de la media para la cuenca 1 y 2 de la zona de estudio. De manera que estos valores serán utilizados para el cálculo del balance hídrico.

Una vez verificado la consistencia de las variables y eliminado los datos atípicos se procedió a realizar un balance hídrico al macro deslizamiento Chalacay.

#### 4.7 Balance hídrico

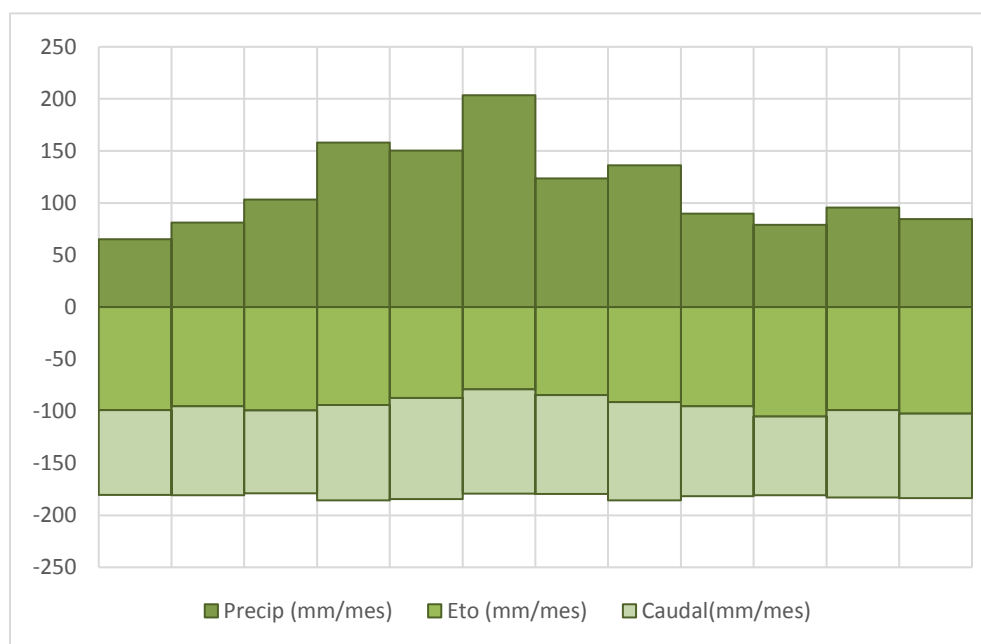
El caudal que circula por las cuencas en Chalacay se calculó con el método de trasposición de caudales utilizando la cuenca Collay como se muestra en los capítulos anteriores, la evapotranspiración se determinó por medio del método FAO: Penman Monteith, Blanney – Criddle y Thornthwaite y la precipitación son datos recopilados y analizados de la estación más cercana (Palmas). Con todos estos datos a partir de la ecuación simplificada del balance hídrico (ecuación 1) se determinó el almacenamiento de agua de las dos cuencas en Chalacay.



#### 4.7.1 Método FAO: Penman Monteith

*Tabla 8. Resultados del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método FAO: Penman Monteith.*

Mes	Precipitación (mm/mes)	Evapotranspiración (mm/mes)	Caudal (mm/mes)	Almacenamiento (mm/mes)
Enero	65,14	99,10	81,34	-115,29
Febrero	81,23	95,15	85,59	-99,51
Marzo	103,41	99,32	79,57	-75,47
Abril	157,87	93,98	91,64	-27,75
Mayo	150,36	87,44	96,94	-34,03
Junio	203,34	79,02	100,22	24,11
Julio	123,56	84,49	94,97	-55,91
Agosto	136,16	91,28	94,38	-49,50
Septiembre	89,70	95,15	86,50	-91,96
Octubre	79,01	105,27	75,54	-101,80
Noviembre	95,51	99,06	83,88	-87,43
Diciembre	84,63	102,37	81,04	-98,78

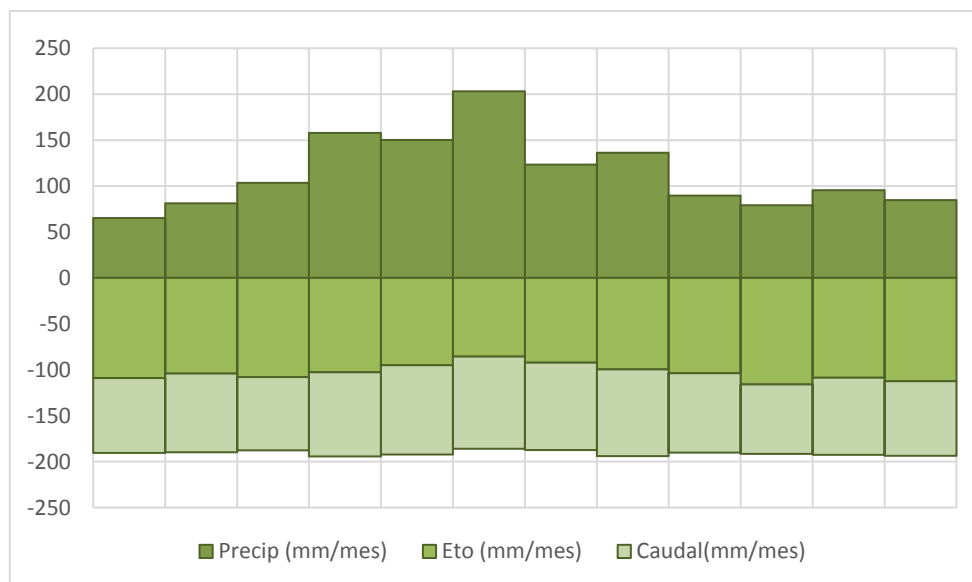


*Figura 34. Esquema del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método FAO: Penman Monteith.*



*Tabla 9 Resultados del balance hídrico para la cuenca 2 en Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método FAO: Penman Monteith*

Mes	Precipitación (mm/mes)	Evapotranspiración (mm/mes)	Caudal (mm/mes)	Almacenamiento (mm/mes)
Enero	65,14	109,04	81,34	-125,24
Febrero	81,23	104,16	85,59	-108,52
Marzo	103,41	108,05	79,57	-84,20
Abril	157,87	102,66	91,64	-36,43
Mayo	150,36	95,18	96,94	-41,76
Junio	203,34	85,66	100,22	17,47
Julio	123,56	92,38	94,97	-63,79
Agosto	136,16	99,61	94,38	-57,83
Septiembre	89,70	103,72	86,50	-100,53
Octubre	79,01	115,96	75,54	-112,49
Noviembre	95,51	108,65	83,88	-97,02
Diciembre	84,63	112,43	81,04	-108,84



*Figura 35. Esquema del balance hídrico para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método FAO: Penman Monteith.*





Se puede notar en las figuras anteriores el resultado del balance hídrico en el macro deslizamiento Chalacay aplicando el método FAO: Penman Monteith para la determinación de la evapotranspiración.

El almacenamiento durante un año hidrológico del balance hídrico resultó en su mayoría negativo (disminución) a excepción del mes de junio que son correspondientes a los meses de mayor precipitación en dichas cuencas.

En general el almacenamiento en la zona oscila entre -115.29 y 24.11 mm/mes para la cuenca 1 y para la cuenca 2 oscila entre -125.24 y 17.46 mm/mes. Además se puede observar que los meses de mayor precipitación corresponden a los meses de menor evapotranspiración y mayor caudal en la zona de estudio.

#### 4.7.2 Método Thornthwaite

*Tabla 10. Resultados del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método Thornthwaite*

Mes	Precipitación (mm/mes)	Evapotranspiración (mm/mes)	Caudal (mm/mes)	Almacenamiento (mm/mes)
Enero	65,14	56,74	81,34	-72,93
Febrero	81,23	50,73	85,59	-55,09
Marzo	103,41	55,39	79,57	-31,54
Abril	157,87	53,43	91,64	12,80
Mayo	150,36	52,92	96,94	0,49
Junio	203,34	46,68	100,22	56,45
Julio	123,56	41,53	94,97	-12,94
Agosto	136,16	55,61	94,38	-13,83
Septiembre	89,70	48,54	86,50	-45,35
Octubre	79,01	55,88	75,54	-52,41
Noviembre	95,51	54,60	83,88	-42,97
Diciembre	84,63	57,31	81,04	-53,72

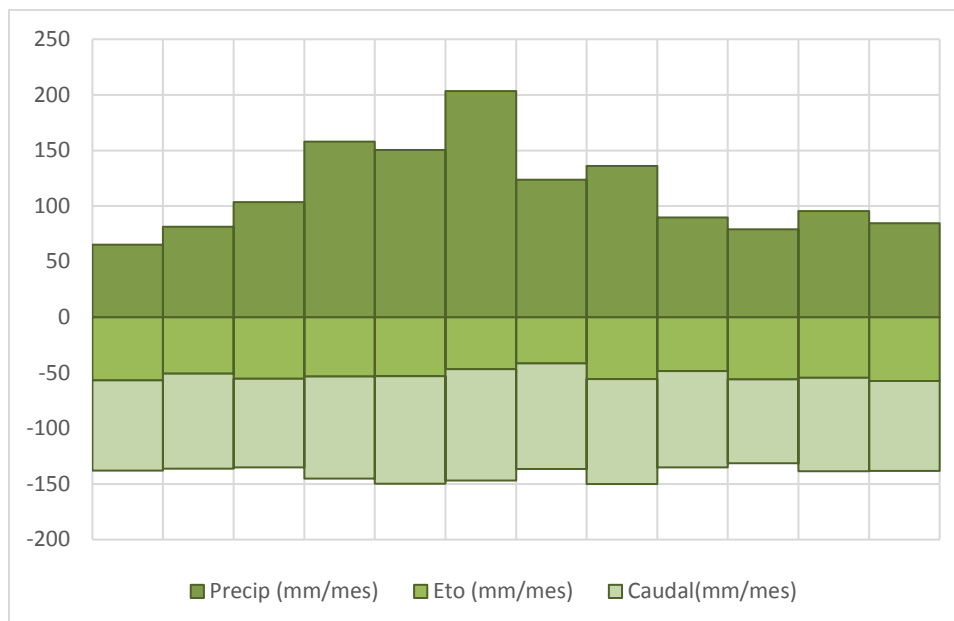
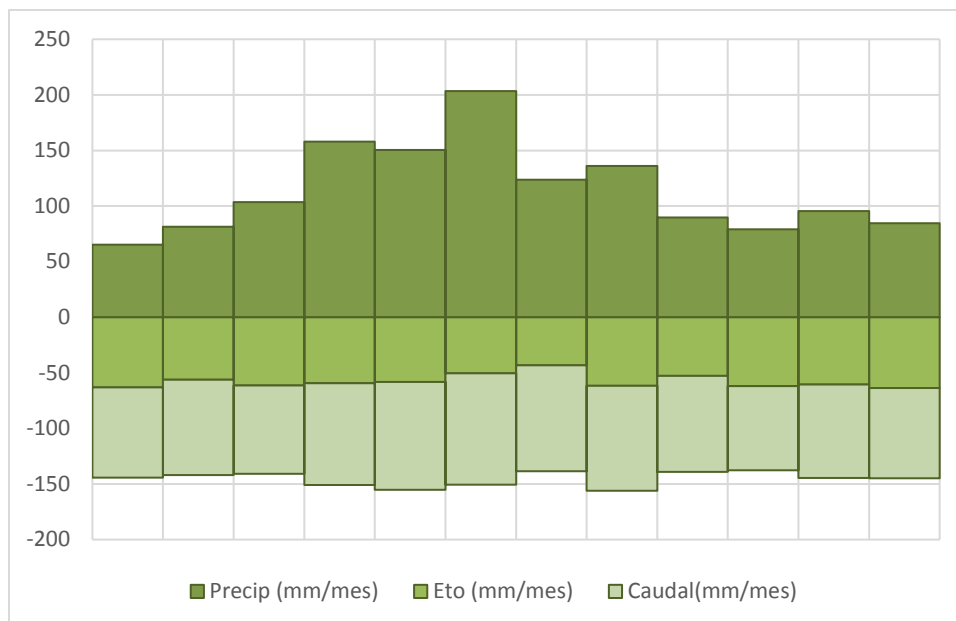


Figura 36. Esquema del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método Thornthwaite.

Tabla 11. Resultados del balance hídrico para la cuenca 2 en Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método Thornthwaite.

Mes	Precipitación (mm/mes)	Evapotranspiración (mm/mes)	Caudal (mm/mes)	Almacenamiento (mm/mes)
Enero	65,14	63,04	81,35	-79,25
Febrero	81,23	56,29	85,61	-60,68
Marzo	103,41	61,37	79,58	-37,54
Abril	157,87	59,24	91,66	6,97
Mayo	150,36	58,21	96,96	-4,81
Junio	203,34	50,36	100,24	52,75
Julio	123,56	43,38	95,00	-14,82
Agosto	136,16	61,77	94,40	-20,01
Septiembre	89,70	52,67	86,52	-49,50
Octubre	79,01	61,97	75,56	-58,51
Noviembre	95,51	60,60	83,90	-48,99
Diciembre	84,63	63,79	81,05	-60,22



*Figura 37. Esquema del balance hídrico para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método Thornthwaite.*

Se puede notar en las figuras anteriores el resultado del balance hídrico en el macro deslizamiento Chalacay aplicando el método Thornthwaite para la determinación de la evapotranspiración.

El almacenamiento durante un año hidrológico del balance hídrico resulto en su mayoría negativo(disminución) a excepción de los meses de abril, mayo y junio en la cuenca 1 y los meses de abril y junio para la cuenca 2 que son correspondientes a los meses de mayor precipitación en dichas cuencas.

En general el almacenamiento en la zona oscila entre -72.93 y 56.45 mm/mes para la cuenca 1 y para la cuenca 2 oscila entre -79.25 y 52.75 mm/mes. Además se puede observar que los meses de mayor precipitación corresponden a los meses de menor evapotranspiración y mayor caudal en la zona de estudio.



#### 4.7.3. Método Blannney – Criddle

Tabla 12. Resultados del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método Blannney – Criddle

Mes	Precipitación (mm/mes)	Evapotranspiración (mm/mes)	Caudal (mm/mes)	Almacenamiento (mm/mes)
Enero	65,14	56,71	81,34	-72,91
Febrero	81,23	70,80	85,59	-75,16
Marzo	103,41	85,51	79,57	-61,66
Abril	157,87	101,27	91,64	-35,04
Mayo	150,36	97,62	96,94	-44,21
Junio	203,34	97,16	100,22	5,97
Julio	123,56	86,18	94,97	-57,60
Agosto	136,16	94,27	94,38	-52,50
Septiembre	89,70	92,61	86,50	-89,42
Octubre	79,01	91,19	75,54	-87,71
Noviembre	95,51	76,64	83,88	-65,01
Diciembre	84,63	69,00	81,04	-65,41

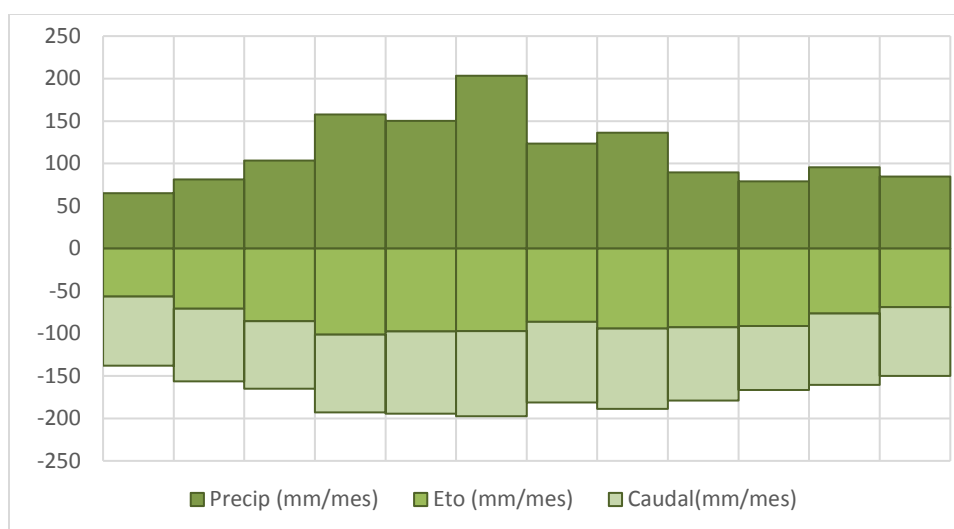
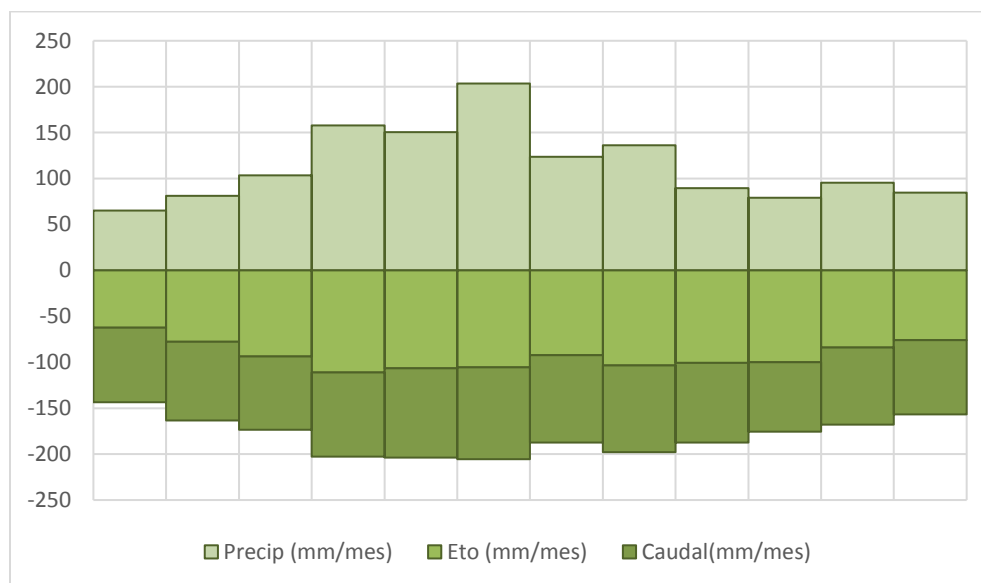


Figura 38. Esquema del balance hídrico para la cuenca 1 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método Blannney – Criddle.



*Tabla 13. Resultados del balance hídrico para la cuenca 2 en Chalacay desde enero del 2001 hasta diciembre del 2008. Método Blanney – Criddle.*

Mes	Precipitación (mm/mes)	Evapotranspiración (mm/mes)	Caudal (mm/mes)	Almacenamiento (mm/mes)
Enero	65,14	62,27	81,34	-78,46
Febrero	81,23	77,69	85,59	-82,05
Marzo	103,41	93,77	79,57	-69,92
Abril	157,87	111,09	91,64	-44,86
Mayo	150,36	106,76	96,94	-53,34
Junio	203,34	105,45	100,22	-2,32
Julio	123,56	92,36	94,97	-63,77
Agosto	136,16	103,49	94,38	-61,72
Septiembre	89,70	100,74	86,50	-97,54
Octubre	79,01	100,04	75,54	-96,56
Noviembre	95,51	84,11	83,88	-72,48
Diciembre	84,63	75,81	81,04	-72,22



*Figura 39. Esquema del balance hídrico para la cuenca 2 en Chalacay desde enero de 2001 hasta diciembre de 2008. Método Blanney – Criddle.*

Se puede notar en las figuras anteriores el resultado del balance hídrico en el macro deslizamiento Chalacay aplicando el método Blanney – Criddle para la determinación de la evapotranspiración.

El almacenamiento durante un año hidrológico del balance hídrico resulto en su mayoría negativo (disminución) a excepción del mes de junio en la cuenca 1 y los meses de abril,

mayo y junio para la cuenca 2 que son correspondientes a los meses de mayor precipitación en dichas cuencas.

En general el almacenamiento en la zona oscila entre -72.91 y 5.97 mm/mes para la cuenca 1 y para la cuenca 2 oscila entre -72.93 y 56.45 mm/mes. Además se puede observar que los meses de mayor precipitación corresponden a los meses de menor evapotranspiración y mayor caudal en la zona de estudio.

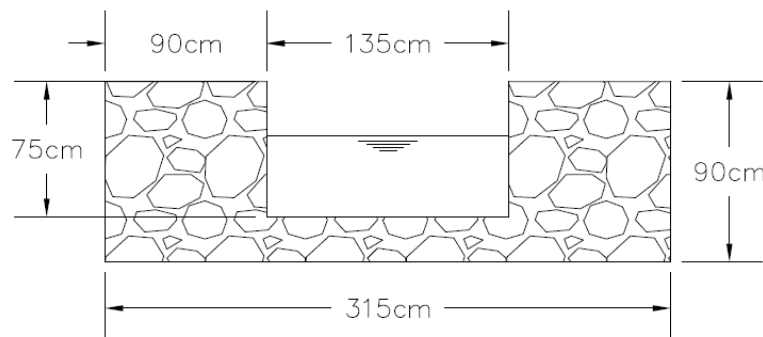
#### 4.8 Diseño de vertederos

La utilización de este método permite la lectura periódica del caudal en una escala, por ello se usará para un seguimiento de caudales en el sector de Chalacay.

##### Cuenca 1:

*Tabla 14. Dimensiones del vertedero para la cuenca 1 de Chalacay.*

Caudal	Q	676,81	lt/s
Carga hidráulica	H	0,44	m
Coeficiente de descarga	Cd	0,57	adm
Ancho de la cresta	e	0,29	m
Ancho del canal	B	2,23	m



*Figura 40. Esquema vertedero rectangular para la cuenca 1 en Chalacay.*

##### Cuenca 2:

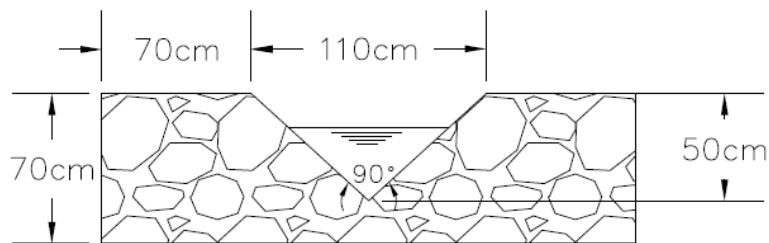
*Tabla 15. Dimensiones del vertedero para la cuenca 2 en Chalacay.*

Caudal	Q	94,46	lt/s
Angulo interno	$\alpha$	90	°C
Carga hidráulica	h	0,34	m
Coeficiente de descarga	Cd	0,58	adm





Ancho de la cresta	e	0,22	m
Ancho del canal	B	1.10	m



*Figura 41. Esquema del vertedero triangular para la cuenca 2 en Chalacay.*

Nota: Los vertederos han sido diseñados según las recomendaciones de la FAO.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ El área del macro deslizamiento Chalacay ha aumentado de manera significativa en los últimos 4 años con una tasa de crecimiento de 17.25 ha/año. El macro deslizamiento puede ser de alto riesgo y por esta razón es de gran importancia tomar medidas que coadyuven a la estabilidad de la zona.
- ✓ El clima en esta zona está determinado por el régimen de humedad del oriente. La precipitación total anual en el macro deslizamiento fluctúa entre 1000 y 2000 mm, prácticamente llueve todos los meses del año, lo que significa que el clima no presenta limitaciones para el crecimiento de vegetación nativa (matorrales y arbustos). Sin embargo las altas precipitaciones en la zona producen desprendimiento y remoción de capas delgadas del suelo, por ello se recomienda sistemas de drenaje en las áreas críticas del macro deslizamiento.
- ✓ Las medidas y determinaciones de los elementos del balance hídrico siempre tienen errores, debido a las limitaciones tecnológicas. La principal causa de error en la medida de la precipitación es la acción del viento que produce una turbulencia que desvía la trayectoria de las gotas de lluvia registrando valores que tiene error por defecto, la presencia de riego en la medición de los caudales y la escasez de estudios hidrogeológicos no permiten que el balance hídrico sea exacto, por ello los valores obtenidos del almacenamiento de agua en la zona de estudio son una aproximación.
- ✓ Los valores obtenidos del almacenamiento de agua en el macro deslizamiento Chalacay son los siguientes: aplicando el método Penman – Monteith se calculó 67.77 mm/mes para la cuenca uno y 76.59 mm/mes para la cuenca dos; aplicando el método Thornthwaite se calculó 25.92mm/mes para la cuenca uno y 31.21mm/mes para la cuenca dos; aplicando el método Blanney – Criddle se calculó 58.38mm/mes para la cuenca uno y 66.27mm/mes para la cuenca dos. Siendo el más importante el método de Penman – Monteith ya que es el único método que abarca la mayor parte de los factores que intervienen en los procesos de evaporación y transpiración.

Sin embargo se determinó la evapotranspiración por el método de Thornthwaite y Blanney Criddle como una manera de verificar los datos obtenidos por el primer método. Los valores observados para ambas cuencas y por los diferentes métodos son evidencia de una nueva entrada de agua a la zona de estudio. Sin embargo este resultado es teórico por lo que se recomienda verificar con un nuevo estudio realizado en campo, donde se determine la infiltración básica de suelos, profundidad de las raíces extractoras del agua, la capacidad de campo, nuevas entradas de agua, y un estudio hidrogeológico al macro deslizamiento Chalacay y así comprobar con los valores calculados.

- ✓ Es recomendable realizar las mediciones del caudal de las quebradas en diferentes épocas para tener registro de los valores mínimos, máximos e intermedios y conocer más de cerca el comportamiento de la fuente en diferentes épocas.
- ✓ La vegetación nativa de la zona (matorrales y arbustos) contribuye sustancialmente a bajar el nivel de amenaza y el riesgo de ocurrencia de la erosión en los taludes. Se recomienda realizar un estudio agronómico a la zona para sembrar vegetación



nativa y árboles con el tamaño adecuado de raíces que ayude a mitigar el problema de erosión en el sector.

- ✓ La carretera construida en el macro deslizamiento en el año 2016 se encuentra ubicada sobre suelo luvisol, el cual se caracteriza por un alto contenido de limo susceptible al deterioro de la estructura si se trabajan en estado húmedo y/o con maquinaria pesada, por lo tanto se recomienda evitar el paso de vehículos pesados sobre esta carretera.
- ✓ Los desplazamientos y hundimientos en la zona de estudio están relacionados con la cercanía de las dos quebradas y la presencia del nivel del embalse. Por esta razón se puede concluir que la presencia de agua en la zona de estudio es un factor de inestabilidad en el macro deslizamiento.
- ✓ Se recomienda realizar cambios en los usos de suelo en las laderas convertidas en áreas de pastoreo de ganado vacuno y cultivos de maíz, y evitar cambio en los usos del suelo en las zonas con amenaza media (parte alta del macro deslizamiento).
- ✓ Se recomienda diseñar sistemas de drenaje superficial en las áreas dedicadas a viviendas y actividades agropecuarias en todo el sector de Chalacay.
- ✓ Se recomienda dirigir el agua acumulada por las cunetas de la vía hacia el sistema de drenaje natural más cercano y así evitar el desagüe del agua en los taludes del macro deslizamiento.



## BIBLIOGRAFÍA

- Abril, Boris, and D Knight. 2004. "Stabilising the Paute River in Ecuador." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering. Instituto de Investigación Y Deslizamientos* 157 (1): 32–38.
- Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación-COSUDE. 2002. *Instrumentos de Apoyo Para El Análisis Y La Gestión de Riesgos Naturales. Guía Para El Especialista*. Managua.  
<http://www.cridlac.org/digitalizacion/pdf/spa/doc14893/doc14893.htm>.
- Allen, Richard G., Luis S. Pereira, Dirk Raes, and Martin Smith. 2006. *Evapotranspiración Del Cultivo Guías Para La Determinación de Los Requerimientos de Agua de Los Cultivos. Estudio FAO Riego Y Drenaje*. Roma. doi:M-56.
- Brazales Puga, María. 2010. "Modelo Hidráulico Físico de Vertederos Como Ayuda de Aprendizaje de La Materia de Hidráulica." Escuela Politécnica del Ejército.  
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/1681/1/T-ESPE-029265.pdf>.
- CELEC EP. 2015. "Informe Deslizamiento Chalacay."
- Dercon, Gerd Bossuyt, Beatrijs De Bievre, Bert Cisneros, Felipe Deckers, Josef. 1998. *Zonificación Agroecológica Del Austro Ecuatoriana*. Edited by Cisneros Gerd, Dercon Bert, De Bievre Felipe. Cuenca-Ecuador.
- FAO. 2014. *World Reference Base for Soil Resources 2014. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106*. Rome. doi:10.1017/S0014479706394902.
- Guns, Marie, and Veerle Vanacker. 2013. "Forest Cover Change Trajectories and Their Impact on Landslide Occurrence in the Tropical Andes." *Environmental Earth Sciences* 70 (7): 2941–52. doi:10.1007/s12665-013-2352-9.
- INAMHI. 1999. *Estudio de Lluvias Intensas. Departamento de Hidrometría*. Quito-Ecuador.
- Ledesma, Rubén, J Gabriel Molina, and Forrest W Young. 2007. "La Visualización Múltiple En El Análisis de Datos : Una Aplicación En Vista Para El Análisis de Componentes Principales."
- Lopez, Jesus. 1998. *Necesidades Hídricas de Los Cultivos*. Cualiacán.
- Ortiz Florez, Ramiro. 2011. *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Bogotá.



- Pinyol, Nuria. 2008. "Landslides in Reservoirs. A Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Approach." Polit cnica de Catalunya.
- River, Marco. 2010. "Análisis Y Propuesta Para La Prevención de Fenómenos Para Deslizamientos En El Barrio de Bellavista-Sector Cabellera de La Virgen En El Cantón Baños de Agua Santa."
- Salazar, F, E Oñate, and R Mor n. 2012. "Modelación Numérica de Deslizamientos de Laderas En Embalses Mediante El Método de Partículas Y Elementos Finitos (PFEM)." *Revista Internacional Dem Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería.*, 112–23.
- Suárez, Jaime. 1989. *Deslizamientos Y Estabilidad de Taludes En Zonas Tropicales.* Instituto de Investigación Sobre Erosión Y Deslizamientos. Bucaramanga, Colombia.
- Unesco. 1981. *Métodos de Cálculo Del Balance Hídrico. Guía Internacional de Investigación Y Métodos.*  
<http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001377/137771so.pdf>.



## **ANEXOS**



**Anexo 1. Estructuras deterioradas por el incremento de los asentamientos.**





**Anexo 2. Grietas de tracción en el macro deslizamiento.**





### Anexo 3. Movimientos de masa





#### Anexo 4. Datos utilizados para corrección de temperatura.

Tabla 16. Datos de las estaciones en la cuenca del río Paute.

ESTACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO PAUTE				
NOMBRE DE LA ESTACIÓN:	UTM X (PSAD56):	UTM Y (PSAD56):	COTA:	Promedio (°C):
Marianza	708890	9684605	3454	8,99
Esmeralda	730471	9651481	2638	12,50
Cañar	729337	9717805	3030	10,96
Labrado	714446	9698474	3440	9,03
Biblián	734403	9700597	2610	13,90
Paute	748572	9693005	2200	17,25
Gualaceo	747281	9681150	2220	17,04
Guarumales	778006	9714189	1600	17,28
Palmas	763546	9699525	2400	14,90
Cuenca Aeropuerto	723992	9680795	2516	15,06

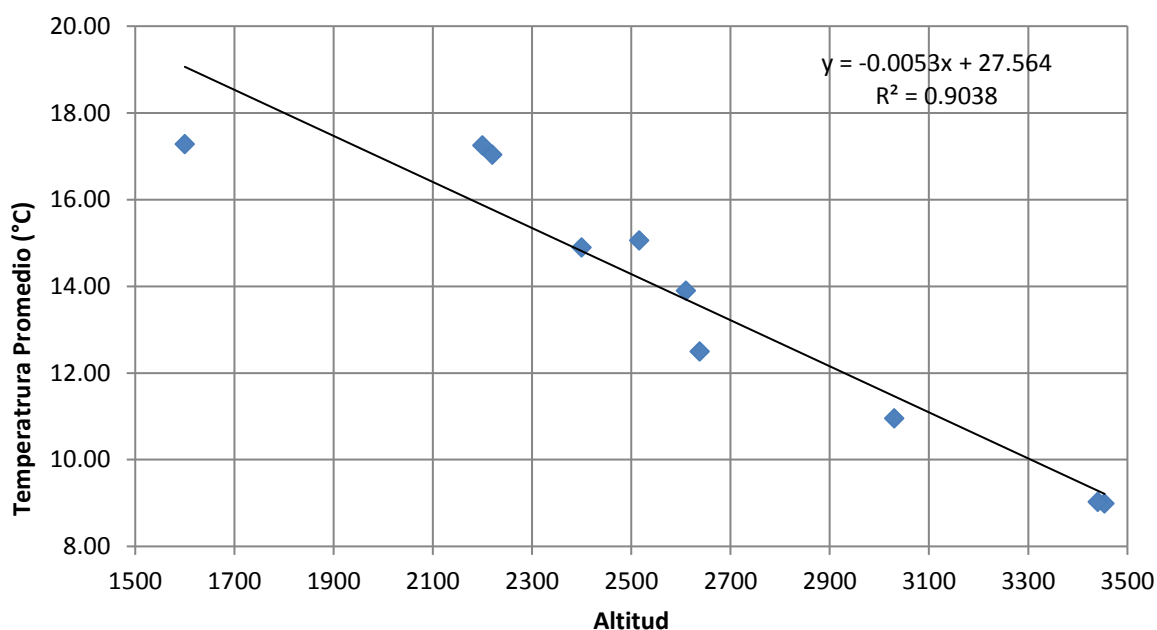


Figura 42. Función de temperatura.



## Anexo 5. Caudales medios mensuales ( $m^3/s$ ) de la cuenca Collay.

Estación	Collay Aj Paute	
Código	H-929	
Cota	2110	m.s.n.m.
Área Aporte	253	km <sup>2</sup>

Tabla 17. Caudales medios mensuales ( $m^3/s$ ) de la cuenca Collay.

COLLAY AJ PAUTE												
Año/mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1965		1,61	1,68	1,89	4,92	7,69	5,57	3,31	3,42	1,54	1,97	1,25
1966	2,48	1,25	2,30	2,30	1,61	2,13	3,79	3,31	2,21	1,42	1,09	1,61
1967	2,21	1,54	1,54	2,87	3,66	3,92	6,47	5,40	2,48	2,13	1,19	1,54
1968	1,97	0,99	1,97	2,05	2,05	2,87	10,66	20,89	17,83	12,43	8,37	0,21
1969	6,66	12,43	13,07	19,98	17,83	22,31	23,81	23,30				
1970	13,07	18,67	17,03	17,03	13,40	25,38	22,31	24,33	15,87	9,85	5,23	4,05
1971	3,66	4,47	6,86	7,69	9,08	16,63	24,33	21,83	19,98	12,75	8,84	8,14
1972	13,07	8,37	6,10	3,92	5,74	10,94	20,89	11,52	14,07	7,48	6,28	4,19
1973	6,47	6,28	6,28	5,23	5,92	6,86	12,43	11,52	8,14	5,23	4,76	3,42
1974	3,66	6,86	4,47	4,92	10,38	9,33	28,76	12,12	12,43	9,85	8,60	8,84
1975	10,40	7,59	7,29	7,72	11,04	28,59	17,11	19,75	8,66	7,26	5,45	4,24
1976	6,14	4,35	5,58	13,90	17,86	22,11	28,73	12,00	8,35	2,07	2,28	1,50
1977	0,98	4,89	4,69	4,69	5,37	9,52	4,73	3,76	5,25	0,85	0,57	1,79
1978	1,69	2,48	4,90	4,83	3,74	15,04	6,25	6,29	3,26	7,72	1,56	0,92
1979	1,06	0,69	1,14	3,54	3,02	4,36	6,23	3,21	2,17	2,47	1,56	2,50
1980	1,90	1,77	2,21	11,79	2,23	4,99	7,37	3,73	5,67	2,11	1,43	0,69
1981	0,67	1,71	2,03	3,28	1,63	4,44	5,36	2,92	2,29	1,78	1,38	1,90
1982	0,96	0,68	1,13	4,18	3,18	2,08	8,32	6,79	2,43	2,32	2,25	4,55
1983	3,07	2,22	4,30	4,17	4,25	3,54	4,68	4,77	3,20	2,66	1,30	1,73
1984	0,80	1,65	1,81	1,18	4,70	18,98	9,35	9,31	2,20	2,10	2,96	1,18
1985	1,09	1,97	1,09	2,97	1,54	5,74	6,66	3,08	1,97	1,36	0,99	1,48
1986	2,03	1,72	3,29	5,00	4,16	11,03	13,70	5,10	8,60			2,69
1987	2,08	7,47	3,55	5,25	4,39	6,48	4,86	4,43	3,90	3,40	0,76	2,11
1988	1,99	3,96	3,84	8,38	4,82	2,67	10,47	2,07	2,35	3,90	2,03	1,02
1990	2,04	1,22	6,24	4,10	8,06	13,20	6,65	10,34	2,37	0,97	1,68	2,31
1998	7,26	7,98	8,20	6,61	6,93	14,16	9,29	14,31	9,12	8,65	7,46	6,90
1999	6,60	8,33	5,37	8,73	10,19	6,41	9,83					
2001	5,66	5,27	4,42	8,37	9,42	7,98	9,31	7,15	5,29		6,14	6,93
2002	6,775	8,125	6,775	7,45	8,125	8,26	8,53	8,53	9,34	8,665	8,125	7,585
2003	7,90	8,27	7,75	7,75	6,36	4,75	4,60	5,53	4,71	4,12	5,66	6,18
2005	6,48	7,72	6,53	8,31	8,23	8,98	7,82	7,65	7,26	7,15	7,10	5,99
2006	7,49	8,11	7,62	7,75	7,70	8,48	8,63	8,05	9,48	8,81	6,52	7,17
2007	8,06	6,88	8,28	9,64	9,28	13,18	8,27	9,79	8,32	8,13	8,53	7,06
2008	8,51	9,17	8,40	8,07	11,54	11,06	12,25	12,34	9,72	10,38	10,39	9,78
Mensual	4,2	4,7	4,8	6,4	6,4	10,0	11,4	9,1	6,6	4,8	3,7	3,2



## Anexo 6. Coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) para cultivos perennes.

Tabla 18. Coeficientes de cultivo para determinar la curva de crecimiento de algunos cultivos perennes ( $K_c$ ).

**COEFICIENTES DE CULTIVO ( $K_c$ ) PARA CULTIVOS PERENNES**

Mes	Caña	Alfalfa	Pasto	Vid	Cítricos	Frutales de hoja caduca	Frutales de hoja perenne
1	0.30	0.65	0.48	0.20	0.65	0.20	0.60
2	0.35	0.75	0.60	0.23	0.67	0.25	0.75
3	0.50	0.85	0.75	0.30	0.69	0.35	0.85
4	0.60	1.00	0.85	0.50	0.70	0.65	1.00
5	0.77	1.10	0.87	0.70	0.71	0.85	1.10
6	0.90	1.13	0.90	0.80	0.72	0.95	1.12
7	0.98	1.12	0.90	0.80	0.72	0.98	1.12
8	1.02	1.08	0.87	0.75	0.71	0.85	1.05
9	1.02	1.00	0.85	0.67	0.70	0.50	1.00
10	0.98	0.90	0.80	0.50	0.68	0.30	0.85
11	0.90	0.80	0.65	0.35	0.67	0.20	0.75
12	0.78	0.65	0.60	0.25	0.65	0.20	0.60





**Anexo 7. Coeficientes globales de usos consuntivos (Kg) para diferentes cultivos.**

*Tabla 19. Coeficientes globales (Kg) de algunos cultivos.*

Cultivo	Periodo de crecimiento vegetativo	Coeficientes Globales	
		K <sub>G</sub>	
		Región húmeda	Región árida
Garbanzo	4 a 5 meses	0.6	0.7
Girasol	4 meses	0.5	0.65
Gladiola	3 a 4 meses	0.6	
Haba	4 a 5 meses	0.6	0.7
Hortalizas	2 a 4 meses	0.6	
Jitomate	4 meses	0.7	
Lechuga y col	3 meses	0.7	
Lenteja	4 meses	0.6	0.7
Lino	7 a 8 meses	0.7	0.8
Maiz	4 a 7 meses	0.75	0.85
Mango	Todo el año	0.75	0.8
Melón	3 a 4 meses	0.6	
Nogal	Entre heladas	0.7	
Papa	3 a 5 meses	0.65	0.75
Palma Datilera	Todo el año	0.65	0.8
Palma de coco	Todo el año	0.8	0.9
Papaya	Todo el año	0.6	0.8
Plátano	Todo el año	0.8	1
Pasto de gramíneas Pastos de trebol	Todo el año	0.75	
Ladino	Todo el año	0.8	0.85
Remolacha	6 meses	0.65	0.75
Sandía	3 a 4 meses	0.6	
Sorgo	3 a 5 meses	0.7	
Soya	3 a 5 meses	0.6	0.7
Tabaco	4 a 5 meses	0.7	0.8
Tomate	4 a 5 meses	0.7	
Zanahoria	2 a 4 meses	0.6	



**Anexo 8. Caudales medios mensuales de la cuenca 1 en Chalacay.**

*Tabla 20. Caudales medios mensuales (lt/s) de la cuenca 1 en Chalacay.*

Cuenca 1												
Año/mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1965		63,40	66,07	74,58	193,72	303,13	219,35	130,24	134,82	60,82	77,60	49,07
1966	97,66	49,07	90,58	90,58	63,40	83,90	149,31	130,24	87,19	55,89	42,90	63,40
1967	87,19	60,82	60,82	113,06	144,36	154,39	254,90	212,72	97,66	83,90	46,94	60,82
1968	77,60	39,12	77,60	80,70	80,70	113,06	419,96	823,04	702,65	489,76	329,68	8,14
1969	262,51	489,76	514,87	787,16	702,65	879,15	938,11	918,13				
1970	514,87	735,58	670,84	670,84	527,79	1000,01	879,15	958,41	625,18	388,02	206,24	159,60
1971	144,36	176,04	270,28	303,13	357,95	655,35	958,41	860,13	787,16	502,20	348,33	320,64
1972	514,87	329,68	240,20	154,39	226,14	431,03	823,04	453,84	554,35	294,65	247,47	164,95
1973	254,90	247,47	247,47	206,24	233,09	270,28	489,76	453,84	320,64	206,24	187,69	134,82
1974	144,36	270,28	176,04	193,72	409,10	367,77	1133,02	477,56	489,76	388,02	338,91	348,33
1975	409,64	299,16	287,41	304,30	434,97	1126,52	674,30	778,18	341,37	285,94	214,73	167,01
1976	241,90	171,42	219,87	547,66	703,66	871,05	1132,03	472,78	328,89	81,49	89,93	59,10
1977	38,54	192,71	184,63	184,63	211,43	375,14	186,47	148,29	207,02	33,40	22,39	70,48
1978	66,44	97,64	193,08	190,14	147,19	592,44	246,30	247,77	128,47	304,30	61,30	36,34
1979	41,85	27,16	44,78	139,48	118,93	171,79	245,57	126,64	85,53	97,27	61,30	98,37
1980	74,88	69,74	86,99	464,34	87,73	196,75	290,35	146,83	223,54	83,32	56,53	27,16
1981	26,43	67,54	80,02	129,21	64,24	175,09	211,06	114,89	90,30	70,11	54,33	74,88
1982	37,81	26,80	44,41	164,81	125,17	81,86	327,79	267,59	95,80	91,40	88,46	179,13
1983	120,76	87,36	169,58	164,45	167,38	139,48	184,27	187,94	125,90	104,98	51,39	68,27
1984	31,57	64,97	71,21	46,62	185,00	747,71	368,53	366,70	86,63	82,59	116,73	46,62
1985	42,90	77,60	42,90	117,19	60,82	226,14	262,51	121,42	77,60	53,54	39,12	58,31
1986	80,02	67,91	129,57	197,11	163,71	434,60	539,95	200,78	338,80			106,08
1987	81,86	294,39	139,85	206,66	172,89	255,48	191,61	174,36	153,80	133,98	30,10	83,32
1988	78,55	156,00	151,23	329,99	189,77	105,35	412,58	81,49	92,50	153,80	80,02	40,01
1990	80,53	48,23	245,93	161,51	317,51	519,95	261,90	407,37	93,23	38,17	66,07	90,96
1998	286,40	314,65	323,43	262,44	273,40	558,14	366,07	564,01	359,68	340,97	294,00	272,02
1999	260,24	328,48	211,66	344,87	398,29	252,71	387,62					
2001	222,96	207,64	174,15	329,78	371,15	314,41	366,81	281,71	208,43		241,92	273,04
2002	266,94	320,13	266,94	293,53	320,13	325,44	336,08	336,08	368,00	341,40	320,13	298,85
2003	311,34	325,64	305,15	305,15	250,39	187,31	181,04	217,80	185,46	162,17	223,00	243,49
2005	255,31	304,17	257,28	327,41	324,26	353,73	308,11	301,41	286,04	281,71	279,90	235,97
2006	295,15	319,81	300,23	305,43	303,42	334,39	340,34	317,52	373,67	347,23	257,24	282,54
2007	317,92	271,35	326,55	379,97	365,75	519,49	326,19	385,88	328,01	320,52	336,32	278,32
2008	335,61	361,42	331,28	318,00	454,79	435,88	482,85	486,39	383,05	409,29	409,52	385,61
Mensual	184,97	204,80	205,97	261,44	269,14	398,79	438,10	368,24	273,79	209,57	168,39	149,55



## Anexo 9. Caudales medios mensuales de la cuenca 2 en Chalacay.

Tabla 21. Caudales medios mensuales (lt/s) de la cuenca 2 en Chalacay.

Cuenca 2												
Año/mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1965		8,85	9,22	10,41	27,04	42,31	30,62	18,18	18,82	8,49	10,83	6,85
1966	13,63	6,85	12,64	12,64	8,85	11,71	20,84	18,18	12,17	7,80	5,99	8,85
1967	12,17	8,49	8,49	15,78	20,15	21,55	35,58	29,69	13,63	11,71	6,55	8,49
1968	10,83	5,46	10,83	11,26	11,26	15,78	58,62	114,88	98,08	68,36	46,02	1,14
1969	36,64	68,36	71,87	109,87	98,08	122,71	130,94	128,15				
1970	71,87	102,67	93,64	93,64	73,67	139,58	122,71	133,77	87,26	54,16	28,79	22,28
1971	20,15	24,57	37,73	42,31	49,96	91,47	133,77	120,06	109,87	70,10	48,62	44,75
1972	71,87	46,02	33,53	21,55	31,57	60,16	114,88	63,35	77,38	41,13	34,54	23,02
1973	35,58	34,54	34,54	28,79	32,53	37,73	68,36	63,35	44,75	28,79	26,20	18,82
1974	20,15	37,73	24,57	27,04	57,10	51,33	158,15	66,66	68,36	54,16	47,30	48,62
1975	57,18	41,76	40,12	42,47	60,71	157,24	94,12	108,62	47,65	39,91	29,97	23,31
1976	33,76	23,93	30,69	76,44	98,22	121,58	158,01	65,99	45,91	11,37	12,55	8,25
1977	5,38	26,90	25,77	25,77	29,51	52,36	26,03	20,70	28,90	4,66	3,13	9,84
1978	9,27	13,63	26,95	26,54	20,55	82,69	34,38	34,58	17,93	42,47	8,56	5,07
1979	5,84	3,79	6,25	19,47	16,60	23,98	34,28	17,68	11,94	13,58	8,56	13,73
1980	10,45	9,73	12,14	64,81	12,25	27,46	40,53	20,49	31,20	11,63	7,89	3,79
1981	3,69	9,43	11,17	18,03	8,97	24,44	29,46	16,04	12,60	9,79	7,58	10,45
1982	5,28	3,74	6,20	23,00	17,47	11,43	45,75	37,35	13,37	12,76	12,35	25,00
1983	16,86	12,19	23,67	22,95	23,36	19,47	25,72	26,23	17,57	14,65	7,17	9,53
1984	4,41	9,07	9,94	6,51	25,82	104,37	51,44	51,18	12,09	11,53	16,29	6,51
1985	5,99	10,83	5,99	16,36	8,49	31,57	36,64	16,95	10,83	7,47	5,46	8,14
1986	11,17	9,48	18,09	27,51	22,85	60,66	75,37	28,03	47,29			14,81
1987	11,43	41,09	19,52	28,85	24,13	35,66	26,74	24,34	21,47	18,70	4,20	11,63
1988	10,96	21,77	21,11	46,06	26,49	14,70	57,59	11,37	12,91	21,47	11,17	5,58
1990	11,24	6,73	34,33	22,54	44,32	72,57	36,56	56,86	13,01	5,33	9,22	12,70
1998	39,98	43,92	45,15	36,63	38,16	77,91	51,10	78,72	50,20	47,59	41,04	37,97
1999	36,32	45,85	29,54	48,14	55,59	35,27	54,10					
2001	31,12	28,98	24,31	46,03	51,80	43,89	51,20	39,32	29,09		33,77	38,11
2002	37,26	44,68	37,26	40,97	44,68	45,43	46,91	46,91	51,36	47,65	44,68	41,71
2003	43,46	45,45	42,59	42,59	34,95	26,14	25,27	30,40	25,89	22,64	31,13	33,99
2005	35,64	42,46	35,91	45,70	45,26	49,37	43,01	42,07	39,93	39,32	39,07	32,94
2006	41,20	44,64	41,91	42,63	42,35	46,67	47,50	44,32	52,16	48,47	35,91	39,44
2007	44,38	37,87	45,58	53,04	51,05	72,51	45,53	53,86	45,78	44,74	46,94	38,85
2008	46,84	50,45	46,24	44,39	63,48	60,84	67,40	67,89	53,47	57,13	57,16	53,82
Mensual	25,82	28,59	28,75	36,49	37,57	55,66	61,15	51,40	38,21	29,25	23,50	20,87



## Anexo 10. Caudal aforado de la cuenca 1 en Chalacay

*Tabla 22. Método del molinete*

Fecha	Área (m <sup>2</sup> )	Velocidad el caudal (m/s)	Caudal (lt/s)	
09/10/2016	0,24	0,157	37,68	
10/10/2016	0,24	0,183	43,92	
11/10/2016	0,24	0,166	39,84	
15/10/2016	0,24	0,143	34,32	
22/10/2016	0,24	0,132	31,68	

## Anexo 11. Caudal aforado de la cuenca 2 en Chalacay

*Tabla 23. Método volumétrico*

Fecha	Tiempo (s)	Cantidad (lt/s)	Caudal (lt/s)
09/10/2016	1,8	10	6,11
10/10/2016	3,58	18	5,03
11/10/2016	3,33	15,3	4,60
15/10/2016	3,5	15	4,29
22/10/2016	3,84	16,5	4,30
29/10/2016	3,85	17	4,42
30/10/2016	3,32	15,3	4,61
31/10/2016	3,05	14,58	5,01